



**Daniel Alexandre Santos Madeira**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

## **Influência da degradação de GFRP na sua resistência mecânica**

### **Exemplo de aplicação em muretes de alvenaria de tijolo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Fernando F. S. Pinho

Co-orientador: Professor Doutor Manuel A. J. G. Silva

Júri:

Presidente: Professora Doutora Ildi Cismasiu

Arguente: Professor Doutor Hugo E. C. C. Biscaia

Vogal: Professor Doutor Fernando F. S. Pinho



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho 2020



**Influência da degradação de varões de fibra de vidro na sua resistência mecânica. Exemplo de aplicação em muretes de alvenaria de tijolo**

Copyright © Daniel Alexandre Santos Madeira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





## **Agradecimentos**

A presente dissertação foi concebida ao longo de mais de seis meses, tendo-se o autor deparado com várias dificuldades e obstáculos, que apenas foram ultrapassados devido ao incentivo de várias pessoas, às quais me sinto no dever de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Manuel Gonçalves da Silva expresso o meu profundo agradecimento, não apenas pela exigência tida e dedicação prestada ao longo de todo o trabalho desenvolvido, mas também pela disponibilidade, sinceridade e incentivo com que sempre me brindou, mesmo nos períodos mais críticos. Agradeço ainda a transmissão de conhecimentos e ideias que não só enriqueceram o trabalho, mas também o meu conhecimento pessoal. Foi um privilégio trabalhar sob a sua orientação - obrigado!

Ao professor Fernando Pinho também agradeço profundamente, por todo o rigor e exigência que transmitiu, que em muito enriqueceram o presente trabalho. Agradeço todo o empenho demonstrado e o facto de, apesar de se encontrar de sabática, ter conseguido estar presente para ajudar, sempre que necessário. Foi um privilégio trabalhar sob a sua orientação - obrigado!

Ao Mestre Vítor Silva pela assistência e conselhos nos trabalhos desenvolvidos no laboratório do departamento de engenharia civil

Aos técnicos Sr. José Gaspar e Dr. Jorge Silvério pela assistência assídua em todos os trabalhos desenvolvidos e na resolução de problemas e obstáculos no laboratório. A sua ajuda foi um aspeto fundamental neste trabalho. Um grande agradecimento aos técnicos, em especial ao Dr. Jorge Silvério, que esteve sempre presente.

Ao laboratório REQUIMTE do Departamento de Química, em especial à técnica Carla Rodrigues, pela simpatia e realização dos ensaios de temperatura de transição vítrea.

Ao CENIMAT, em especial ao Professor Rui Silva pela disponibilidade em ajudar nos métodos de preparação das amostras de GFRP para a análise SEM. Agradecer também o esforço pelo conhecimento que transmitiu sobre os resultados e interpretação da análise SEM em amostras de varões de GFRP.

Aos meus amigos, pela ajuda e companhia durante todo o trabalho desenvolvido.

À minha família, por todo o apoio, educação e valores que me transmitiram ao longo deste caminho. Sem este apoio, não teria sido possível produzir este trabalho.



## Resumo

Com o desenvolvimento da indústria da construção e a constante tentativa de desenvolver novos e melhores materiais, tendo em conta alguns fatores tais como a sustentabilidade ambiental e durabilidade, procedeu-se nesta dissertação ao estudo dos varões de fibra de vidro (GFRP) e da sua utilização em paredes de alvenaria de tijolo cerâmico.

É nesse contexto que o presente trabalho se debruça sobre o estudo em varões de GFRP. Assim, foi desenvolvido um envelhecimento de 8 varões de GFRP em ambiente salino de 50 g/l, sendo 4 deles à temperatura ambiente e os restantes à temperatura de 60°C. Para a análise da degradação mecânica e física das amostras sujeitas aos ambientes agressivos, procedeu-se à seguinte campanha experimental (para amostras às 0, 1500, 3600 e 5000 horas): estudo difusão das soluções nos varões de GFRP, resistência à flexão, módulo de elasticidade, determinação da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e análise em microscópio de varrimento eletrónico (SEM). Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento dos varões nos diferentes ambientes e comparação com resultados obtidos por outros autores.

Adicionalmente foram colocados varões de GFRP em muretes de alvenaria de tijolo, pretendendo-se assim avaliar a resposta mecânica das paredes de alvenaria de tijolo a uma carga monotónica fora do plano, ou seja, a uma carga perpendicular aos muretes. A campanha experimental realizou-se com 6 muretes sendo utilizadas as seguintes soluções: 2 muretes de referência - sem varões de GFRP, 2 muretes com varões no seu estado normal e 2 muretes com varões envelhecidos num ambiente alcalino a 60°C durante 5184h. Em cada murete foram colocados, nas suas juntas horizontais de argamassa, 2 varões de GFRP.

Ao longo da campanha experimental, foi possível verificar uma degradação acentuada nas propriedades mecânicas e físicas dos varões de GFRP. Foi possível observar que a degradação depende do enrolamento exterior do varão de GFRP, sendo o caso das amostras sujeitas ao ambiente à temperatura mais elevada e no ambiente alcalino que se verificou maior degradação.

Os resultados mostraram que os muretes de alvenaria de tijolo (com varões GFRP nas suas juntas) tornaram-se mais resistentes à flexão, com a resistência a cargas fora do plano a aumentar em cerca de 2 vezes, quando comparada com o sucedido com as alvenarias sem varões. Com esta análise, verificou-se que a utilização de GFRPs aumentou a resistência mecânica, diminuiu a deformação e (devido à utilização em interior) manteve a estética da alvenaria.

**Palavras-Chave:** Durabilidade, GFRP, ambientes de exposição, Alvenaria.



## Abstract

With the development of the construction industry and the constant attempt to develop new and better materials, taking into account environmental sustainability, durability, safety and the fact that better properties are available, this dissertation included the study of fiberglass rebars (GFRP) and their use in brick brickwork walls.

It is in this context that the present work focuses on the study in GFRP rebars. Thus, an aging of 8 GFRP rebars was developed in a saline environment of 50 g/l, with 4 of them at room temperature and the rest at a temperature of 60°C. For the analysis of the mechanical and physical degradation of the samples on the aggressive environments, the following experimental campaign were performed (at 0, 1500, 3600 and 5000 hours): study diffusion of GFRP rebar solutions, bending resistance, modulus of elasticity, glass transition temperature ( $T_g$ ) and scanning electron microscope (SEM). This study aimed to analyze the behavior of the rebar in different environments and comparison with the results obtained by other authors.

Additionally, GFRP rebars were introduced into brick masonry walls, with the purpose of evaluating the mechanical response of brick masonry walls to a monotonic load outside the plane, that is, to a load perpendicular to the walls. The experimental campaign was carried out with 6 walls and the following solutions were used: 2 reference walls - without GFRP rebars, 2 walls with rebars in their normal state and 2 walls with aged rebars. 2 GFRP rebars were inserted into each wall, in its horizontal mortar joints.

Throughout the experimental campaign, it was possible to see a degradation in the mechanical and physical properties of GFRP rebars. It was possible to observe that the degradation depends on the external winding of the GFRP rebar, however, was the samples in the alkaline environment at the highest temperature that showed greater degradation.

The results showed that the brick masonry walls (with GFRP rebar in their joints) became more resistant to bending, with the resistance to loads out of the plane increasing by about 2 times, when compared to the success with the masonry without rebars. With this analysis, it was demonstrated that the use of GFRPs increases the mechanical resistance, decreases the deformation and (due to the use in the interior) maintains the aesthetics of the masonry.

Key words: Durability, GFRP, exposure environments, masonry



## Índice do Texto

### Capítulo 1 - Introdução

1.1. Considerações Gerais.....	1
1.2. Objetivos de estudo .....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	3

### Capítulo 2 - Enquadramento do tema

2.1. Introdução .....	5
2.2. Compósitos reforçados com fibras.....	5
2.2.1. História dos FRPs .....	5
2.2.2. Caracterização dos varões reforçados com fibras (FRP).....	6
2.2.3. Tipos de resinas.....	6
2.2.4. Tipos de fibras.....	7
2.2.5. Processo de fabrico de varões de FRPs.....	8
2.2.6. Características dos FRPs .....	9
2.3. Caracterização dos polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) .....	9
2.3.1. Durabilidade dos varões de GFRP.....	10
2.3.1.1. Degradação da matriz .....	12
2.3.1.2. Degradação das fibras de vidro.....	12
2.3.1.3. Degradação na matriz/fibra .....	12
2.3.1.4. Efeitos da temperatura nos GFRP .....	13
2.4. Compósitos reforçados com fibras utilizados em alvenarias.....	15

### Capítulo 3 - Caracterização dos varões de GFRP

3.1. Introdução .....	19
3.2. Caracterização dos materiais.....	19
3.2.1. Varões de GFRP.....	19

3.2.2. Resina S&P Resin 55.....	20
3.3. Envelhecimento acelerado de varões de GFRP .....	20
3.3.1. Preparação das amostras .....	21
3.3.2. Equipamentos .....	21
3.3.3. Ambientes de exposição .....	22
3.4. Caracterização de varões de GFRP .....	23
3.4.1. Difusão molecular das soluções nas amostras de GFRP .....	24
3.4.2. Ensaio de flexão em varões de GFRP .....	27
3.4.3. Microscópio de varrimento eletrônico (SEM) .....	30
3.4.4. Temperatura de Transição vítrea (Tg) .....	34

#### **Capítulo 4 - Comportamento de varões de GFRP em muretes de alvenaria**

4.1. Introdução .....	37
4.2. Caracterização de materiais utilizados na construção dos muretes.....	37
4.2.1. Tijolo cerâmico .....	37
4.2.2. Argamassa .....	38
4.3. Muretes de alvenaria de tijolo cerâmico.....	39
4.3.1. Descrição dos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico .....	39
4.3.2. Definição dos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico .....	40
4.4. Descrição do ensaio dos muretes de alvenaria de tijolo .....	41
4.4.1. Setup de ensaio .....	41
4.4.2. Equipamentos .....	43
4.4.3. Procedimento de ensaio .....	46
4.5. Resultados dos ensaios nos muretes de alvenaria de tijolo.....	46
4.5.1. Série MSV .....	47
4.5.2. Série MVR.....	49
4.5.3. Série MVE .....	52



**Capítulo 5 - Análise e discussão de resultados**

5.1. Introdução .....	55
5.2. Caracterização dos varões de GFRP .....	56
5.2.1. Difusão molecular das soluções nas amostras de GFRP .....	56
5.2.2. Ensaio de flexão em varões de GFRP .....	58
5.2.3. Microscópio de varrimento eletrônico (SEM) .....	62
5.2.3.1. Imagens transversais das amostras de GFRP analisadas em SEM .....	62
5.2.3.2. Imagens longitudinais das amostras de GFRP analisadas em SEM .....	65
5.2.3.3. Considerações finais do ensaio SEM em amostras de GFRP .....	67
5.2.4. Temperatura de transição vítrea (T <sub>g</sub> ) .....	68
5.2.5. Considerações finais dos ensaios de caracterização de varões de GFRP .....	68
5.3. Ensaio da carga perpendicular ao plano em muretes de alvenaria .....	69
5.3.1. Série MSV .....	69
5.3.2. Série MVR .....	70
5.3.3. Série MVE .....	72
5.3.4. Comparação de resultados obtidos nos ensaios dos muretes de alvenaria .....	73

**Capítulo 6 - Conclusões e desenvolvimentos futuros**

6.1. Conclusões .....	77
6.2. Desenvolvimentos Futuros .....	78

<b>Referências Bibliográficas</b> .....	79
---	----

**Anexos**

<b>Anexo A</b> - Ficha técnica dos varões de GFRP .....	87
<b>Anexo B</b> - Ficha técnica da resina S&P 55 .....	89
<b>Anexo C</b> - Dimensionamento de estrutura metálica para ensaio de flexão em varões de GFRP ...	91
<b>Anexo D</b> - Resultados de ensaio à flexão de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino .....	93
<b>Anexo E</b> - Resultados individuais da T <sub>g</sub> do varões de GFRP .....	97



## Índice de figuras

Figura 1.1 - Varões de GFRP.....	1
Figura 2.1 - Imagens SEM de amostras de GFRP submersas no ambiente salino .....	11
Figura 2.2 - Absorção de água em varões de GFRP .....	14
Figura 2.3 - Imagens transversais de amostras de GFRP analisadas em SEM .....	14
Figura 2.4 - Diagrama de força-deslocamento de ensaios em paredes de alvenaria.....	15
Figura 2.5 - Diagrama de resultados dos ensaios em paredes de alvenaria.....	16
Figura 2.6 - Modelo de ensaio em muretes de alvenaria .....	17
Figura 2.7 - Modelo de ensaio em muretes de alvenaria reforçados com GFRP .....	17
Figura 3.1 - Varões de GFRP.....	19
Figura 3.2 - Preparação da resina para selagem dos varões de GFRP.....	20
Figura 3.3 - Colocação de resina nos topos dos varões de GFRP.....	21
Figura 3.4 - Equipamentos de controlo dos ambientes de exposição .....	22
Figura 3.5 - Recipiente de imersão dos varões de GFRP nos ambientes de exposição.....	23
Figura 3.6 - Ganho de massa acumulado nos varões de GFRP imersos na solução salina a 20°C ....	26
Figura 3.7 - Amostras de GFRP após imersão nos ambientes de exposição .....	26
Figura 3.8 - Ensaio de flexão em varões de GFRP .....	27
Figura 3.9 - Preparação de provetes de GFRP para ensaio de flexão.....	28
Figura 3.10 - Estado do provete após ensaio de flexão .....	28
Figura 3.11 - Diagrama tensão-deformação das amostras de varões de GFRP de referência .....	29
Figura 3.12 - Preparação das amostras de GFRP para análise em SEM .....	31
Figura 3.13 - Análise e preparação final de amostras de GFRP para ensaio em SEM.....	32
Figura 3.14 - SEM Zeiss DSM 962.....	32
Figura 3.15 - Amostras de varões de GFRP analisadas no microscópio ótico, corte transversal.....	33
Figura 3.16 - Amostras de varões de GFRP, corte na direção longitudinal às fibras .....	33

Figura 3.17 - Preparação de amostras para a determinação da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ )	34
Figura 3.18 - Resultados da $T_g$ das amostras de GFRP de referência .....	35
Figura 4.1 - Tijolo cerâmico .....	37
Figura 4.2 - Argamassa REABILITA Cal Consolidação .....	38
Figura 4.3 - Representação do murete de alvenaria de tijolo cerâmico .....	39
Figura 4.4 - Localização dos varões de GFRP colocados nos muretes de alvenaria de tijolo .....	40
Figura 4.5 - Sistema de fixação do murete de alvenaria de tijolo cerâmico .....	41
Figura 4.6 - Dispositivo de aplicação da carga perpendicular ao plano dos muretes .....	42
Figura 4.7 - Esquema do sistema de ensaio em muretes de alvenaria de tijolo cerâmico .....	43
Figura 4.8 - Esquema de localização de equipamentos .....	44
Figura 4.9 - Equipamentos utilizados no ensaio em muretes de alvenaria de tijolo .....	44
Figura 4.10 - Localização dos defletômetros nos muretes .....	45
Figura 4.11 - Sistema de aplicação de carga nos muretes .....	46
Figura 4.12 - Pormenores de aplicação de carga nos muretes .....	46
Figura 4.13 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MSV1 .....	47
Figura 4.14 - Murete MSV1 após ensaio de carga perpendicular ao plano .....	47
Figura 4.15 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MSV2 .....	48
Figura 4.16 - Murete MSV2 após ensaio de carga perpendicular ao plano .....	48
Figura 4.17 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MVR1 .....	49
Figura 4.18 - Diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP do murete MVR1 .....	49
Figura 4.19 - Murete MVR1 após ensaio de carga perpendicular ao plano .....	50
Figura 4.20 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MVR2 .....	50
Figura 4.21 - Diagrama tensão-deformação do varão colocado na junta horizontal inferior de GFRP do murete MVR2 .....	51
Figura 4.22 - Murete MVR2 após ensaio de carga perpendicular ao plano .....	51
Figura 4.23 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MVE1 .....	52
Figura 4.24 - Diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP do murete MVE1 .....	52
Figura 4.25 - Murete MVE1 após ensaio de carga perpendicular ao plano .....	53
Figura 4.26 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MVE2 .....	53

Figura 4.27 - Diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP do murete MVE2.....	54
Figura 4.28 - Murete MVE2 após ensaio de carga perpendicular ao plano.....	54
Figura 5.1 - Diagrama de análise da rigidez dos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico.....	55
Figura 5.2 - Diagrama de comportamento real do ensaio em muretes de alvenaria .....	56
Figura 5.3 - Diagrama de variação média de massa dos varões de GFRP em soluções salinas. ....	57
Figura 5.4 - Diagrama médio tensão-deformação médio dos ensaios de flexão nos varões de GFRP .....	58
Figura 5.5 - Gráfico da variação da tensão de rotura em flexão das amostras de GFRP .....	59
Figura 5.6 - Gráfico da variação da deformação na rotura em flexão das amostras de GFRP .....	60
Figura 5.7 - Gráfico da variação do módulo de elasticidade em flexão das amostras de GFRP .....	61
Figura 5.8 - Imagens SEM de amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura ambiente.....	63
Figura 5.9 - Imagens SEM de amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura ambiente.....	63
Figura 5.10 - Imagens SEM de amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura de 60° C .....	64
Figura 5.11 - Imagens SEM de amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura de 60°C .....	65
Figura 5.12 - Imagens SEM de corte longitudinal em amostras GFRP de referência .....	66
Figura 5.13 - Imagens SEM de corte longitudinal em amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura de 60°C e a 5000 horas .....	67
Figura 5.14 - Diagrama da Tg dos varões de GFRP em soluções salinas .....	68
Figura 5.15 - Diagrama de força horizontal-deslocamento nos muretes MSV1 e MSV2.....	69
Figura 5.16 - Diagrama de força horizontal-deslocamento nos muretes MVR1 e MVR2 .....	70
Figura 5.17 - Diagrama de força horizontal-deslocamento nos muretes MVE1 e MVE2.....	72
Figura 5.18 - Diagrama de força horizontal-deslocamento dos muretes de referência e das soluções com varões de GFRP .....	73
Figura 5.19 - Gráfico da força horizontal média perpendicular ao plano dos muretes de alvenaria .....	74
Figura 5.20 - Gráfico do deslocamento médio obtido nos ensaios nos muretes de alvenaria.....	75
Figura 5.21 - Gráfico de rigidez dos muretes de alvenaria.....	75
Figura 5.22 - Gráfico da energia dissipada dos muretes de alvenaria .....	76
Figura C.1 - Dimensionamento de peças metálicas para ensaio de flexão de varões de GFRP .....	91

Figura D.1 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 20°C com 1500h.....	93
Figura D.2 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 20°C com 3600h.....	93
Figura D.3 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 20°C com 5000h.....	93
Figura D.4 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 60°C com 1500h.....	94
Figura D.5 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 60°C com 3600h.....	94
Figura D.6 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 60°C com 5000h.....	94
Figura D.7 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP retirados do murete MVR1 .....	95
Figura D.8 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP retirados do murete MVR2 .....	95
Figura D.9 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP retirados do murete MVE1 .....	95
Figura D.10 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP retirados do murete MVE2 .....	96
Figura E.1 - Diagrama para a determinação da Tg em varões de GFRP sujeitos ao ambiente salino de 20°C.....	97
Figura E.2 - Diagrama para determinação da Tg em varões de GFRP sujeitos ao ambiente salino de 60°C.....	98

## Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Características das resinas termoendurecíveis utilizadas em compósitos reforçados com fibras...	7
Tabela 2.2 - Características das fibras mais utilizadas em compósitos reforçados com fibras .....	8
Tabela 2.3 - Resultados médios obtidos para varões de GFRP sujeitos a um ambiente salino, com uma temperatura de 20°C e 60°C .....	13
Tabela 3.1 - Caraterísticas geométricas e mecânicas à flexão dos GFRP.....	20
Tabela 3.2 - Ambientes de exposição .....	22
Tabela 3.3 - Número de varões de GFRP utilizados em cada ambiente de exposição.....	23
Tabela 3.4 - Quantidade de amostras de GFRP analisadas .....	24
Tabela 3.5 - Resultados médios da massa acumulada nos varões de GFRP imersos nos ambientes de exposição .....	25
Tabela 3.6 - Resultados médios obtidos nos ensaios de flexão das amostras de varões de GFRP em água salgada, a 20°C e 60°C e ambiente alcalino a 60°C.....	30
Tabela 3.7 - Resultados médios da Tg das amostras de GFRP .....	35
Tabela 4.1 - Dimensões médias dos tijolos cerâmicos.....	38
Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de compressão e do módulo de elasticidade .....	38
Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de flexão .....	38
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de compressão .....	39
Tabela 4.5 - Características geométricas dos muretes de alvenaria de tijolo.....	41
Tabela 5.1 - Difusão nas amostras de varões de GFRP .....	58
Tabela 5.2 - Resultados médios obtidos nos ensaios de flexão das amostras de varões de GFRP (em ambiente salino a 20°C e 60°C e ambiente alcalino 60°C).....	59
Tabela 5.3 - Comportamento mecânico dos muretes MSV1 e MSV2 .....	69
Tabela 5.4 - Comportamento mecânico dos muretes MVR1 e MVR2.....	70
Tabela 5.5 - Comparação dos resultados médios obtidos nos ensaios de carga perpendicular ao plano dos muretes MVR com MSV .....	71

Tabela 5.6 - Comportamento mecânico do murete MVE1 E MVE2 .....	72
Tabela 5.7 - Comparação dos resultados médios obtidos nos ensaios de carga perpendicular ao plano dos muretes MVE com MSV.....	73
Tabela 5.8 - Comparação dos resultados médios obtidos no ensaio de carga perpendicular aos muretes .....	74



## Siglas

ASTM	- American Society for Testing and Materials
BSE	- Eletrões retrodifundidos de alta energia ( <i>High energy backscattering electrons</i> , do inglês)
CENIMAT	- Centro de Investigação em Materiais
CFRP	- Polímeros reforçados com fibras de carbono ( <i>Carbon Fiber Reinforce Polymer</i> , do inglês)
DEC	- Departamento de Engenharia Civil
DSC	- Calorimetria Diferencial de Varrimento ( <i>Differential Scanning Calorimetry</i> , do inglês)
EN	- Norma europeia ( <i>European Standards</i> , do inglês)
EXT	- Extensómetros utilizados nos varões de GFRP colocados nos muretes de alvenaria
FCT	- Faculdade de Ciências e Tecnologias
FRP	- Polímeros reforçados com fibras ( <i>Fiber Reinforced Polymer</i> , do inglês)
GFRP	- Polímeros reforçados com fibras de vidro ( <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> , do inglês)
HMB	- Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
LAQV	- Laboratório Associado para a Química Verde
LVDT	- Transdutor de deslocamentos ( <i>Linear Voltage Displacement Transformer</i> , do inglês)
MSV	- Muretes sem varões de GFRP
MVE	- Muretes com varões de GFRP envelhecidos
MVR	- Muretes com varões de GFRP
NP	- Norma Portuguesa
PVC	- Policloreto de vinilo
REQUIMTE	- Laboratório de Análises do Departamento de Química da UNL
SE	- Eletrões secundários de baixa energia ( <i>Low energy secondary electrons</i> , do inglês)
SEM	- Microscópio eletrónico de varrimento ( <i>Scanning Electron Microscope</i> , do inglês)
Tg	- Temperatura de transição vítrea
TML	- Tokio Sokki Kenkyujo Co., Ltd
UNL	- Universidade Nova de Lisboa
URM	- Alvenaria sem reforço ( <i>Unreinforced masonry</i> , do Inglês)

## Símbolos

$M_t$	- Percentagem de água absorvida ao tempo $t$
$W_i$	- Peso do provete
$W_t$	- Peso do provete no tempo $t$
$\sigma_f$	- Tensão à flexão
$\sigma_c$	- Tensão à compressão
$\sigma_{tu}$	- Tensão de rotura à tração
$M$	- Momento fletor
$I$	- Momento de inércia à flexão da secção transversal
$y$	- Distância da linha neutra à fibra exterior
$\varepsilon_f$	- Deformação em flexão dos varões de GFRP
$\varepsilon_c$	- Deformação em compressão dos tijolos
$E_f$	- Módulo de elasticidade em flexão dos varões de GFRP
$E_c$	- Módulo de elasticidade em compressão dos tijolos
$E_t$	- Módulo de elasticidade em tração do aço
$F_{Vmax}$	- Força vertical máxima
$F_{Hmax}$	- Força horizontal máxima
$F_{H1}$	- Força horizontal máxima dos muretes na fase elástica
$\delta_V^{FVmax}$	- Deslocamento vertical correspondente à força horizontal máxima
$\delta_H^{FHmax}$	- Deslocamento horizontal correspondente à força horizontal máxima
$\delta_H^{85\%FHmax}$	- Deslocamento horizontal correspondente à carga de 85%
$U$	- Energia acumulada por deformação
$K$	- Rigidez dos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Considerações Gerais

Os problemas de durabilidade dos materiais mais utilizados nos dias de hoje, nomeadamente o betão e o aço, aliados aos elevados custos de produção e ao incremento nos ritmos de construção têm vindo a impulsionar a pesquisa de novas alternativas, no sentido da obtenção de materiais mais resistentes à degradação ambiental, mais leves e menos exigentes ao nível de manutenção [1].

É no contexto desta necessidade que os materiais plásticos reforçados com fibras (do inglês, *Fiber Reinforced Polymer*) se têm vindo a destacar na indústria da construção. A utilização de fibras que os podem reforçar, designadamente as fibras de vidro (do inglês, *Glass Fiber Reinforced Polymer*), constitui uma alternativa que é alvo de estudo do presente trabalho, como é possível ver na Figura 1.1.

Os polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) são formados pela combinação de dois ou mais materiais, sendo que dois deles são considerados os principais: a resina e as fibras de reforço. A resina, que funciona como um ligante das fibras, poderá ser de vários tipos. No presente estudo, a resina dos varões é de epóxi e as fibras de reforço são de vidro, dispostas em modo unidirecional (Figura 1.1).



Figura 1.1 - Varões de GFRP

Os varões de fibra de vidro vão ganhando espaço na construção devido às suas vantagens, tais como o peso próprio reduzido, a resistência à fadiga, a transparência eletromagnética, a relação resistência/peso próprio e a durabilidade quando expostos a ambientes agressivos [2, 3].

Esta quantidade de vantagens fez com que se começasse a recorrer a estes compósitos, primeiramente na engenharia aeronáutica e na engenharia mecânica, já na engenharia civil demorou um pouco mais a serem utilizados em funções estruturais com solução credível [4, 5]. Esta demora deveu-se à falta de estudo relativamente a questões técnicas importantes para o sector da construção (a deformabilidade,

as ligações entre perfis e a sua durabilidade em ambientes extremos), o que está na origem da necessidade de um acréscimo de conhecimento sobre os FRPs. Esta demora fica também a dever-se ao custo inicial elevado em relação à sua concorrência direta (veja-se o caso do aço) [2].

No entanto, os compósitos foram aparecendo na construção, sobretudo com funções não estruturais, como é o caso dos gradis de pavimento, as escadas, os guarda corpos ou as estações de tratamento, estando, nesse contexto, sujeitos a ambientes quimicamente agressivos. Na área de reforço estrutural ou de reabilitação, os FRPs têm vindo a constituir uma alternativa viável aos materiais existentes, pela sua facilidade de aplicação e pela relação peso/resistência, quando comparados aos seus concorrentes. De notar que, por exemplo, o reforço de estruturas de alvenaria corresponde à tentativa de aumento da sua capacidade resistente a ações a que estão sujeitas, tais como sismos ou forças laterais. Já no campo da reabilitação, vai-se ao encontro da recuperação estrutural, devido à degradação normal dos materiais. É nestas áreas que se recorre aos GFRPs, devido à sua enorme resistência, ao peso reduzido, à adequabilidade, à facilidade de uso e à notória durabilidade [5, 6].

Este estudo é motivado por acrescentar e consolidar estudos sobre os GFRPs, no sentido da sua maior aplicação na construção. Nesse sentido, é fundamental conhecer os fenómenos de degradação existentes perante a exposição a ambientes agressivos e compreender o seu efeito nas características mecânicas, físicas e químicas dos GFRP. É neste sentido que se enquadra o estudo realizado na presente dissertação.

O presente estudo vai ao encontro de estudos prévios em varões de fibra de vidro desenvolvidos no DEC da FCT NOVA. Estes estudos elaborados sobre a influência de ambientes agressivos em GFRP foram desenvolvidos por Estevão [7], que analisou os efeitos do cloreto de sódio e dos sulfatos em varões de GFRP.

Na secção seguinte são descritos os objetivos e a organização da presente dissertação.

## **1.2. Objetivos de estudo**

O presente estudo tem como objetivo analisar a durabilidade de varões de fibra de vidro, utilizados na construção, quando sujeitos a ambientes de envelhecimento acelerado. Deste modo, para o estudo da durabilidade, foram analisados varões de GFRP sujeitos a ambientes agressivos, analisada a degradação mecânica e física e o comportamento quando utilizados em muretes de alvenaria sujeitos a cargas perpendiculares ao seu plano. Neste contexto, foram traçados os pontos seguintes, de modo a atingir o objetivo proposto:

- Estudo e revisão da literatura, com ênfase no estudo da durabilidade dos varões de fibra de vidro e na sua utilização em alvenarias.
- Caracterização dos varões de fibra de vidro.
- Envelhecimento de varões de fibra de vidro (GFRP) em água com uma concentração de cloreto de sódio de 50 g/l, à temperatura ambiente e a 60°C.
- Estudo da difusão através das curvas de ganho de massa de varões imersos nas soluções, comparando com resultados obtidos anteriormente no DEC.

- Ensaio à flexão dos varões GFRP, com e sem envelhecimento e utilizados nos muretes de alvenaria de tijolo.
- Análise dos efeitos da degradação dos ambientes de exposição nos varões com recurso ao microscópio eletrónico de varrimento (SEM), em amostras com corte transversal e longitudinais ao sentido das fibras.
- Obtenção da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da resina dos varões, com e sem envelhecimento, de modo a auxiliar a interpretação de resultados sobre a degradação observada.
- Análise dos resultados obtidos no programa experimental realizado e comparação com ensaios anteriores sobre a mesma temática.
- Conclusões e sugestões para trabalhos posteriores.

### 1.3. Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto por 6 capítulos que descrevem as várias etapas de estudo.

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta-se uma breve introdução ao tema estudado, sendo descritos os objetivos e a estrutura da dissertação.
- **Capítulo 2 - Enquadramento do tema:** Introdução do material estudado no presente trabalho: os varões de fibra de vidro (GFRP). Pesquisa na literatura de trabalhos experimentais de outros autores sobre o mesmo tema.
- **Capítulo 3 - Caracterização dos varões de GFRP:** Descrição da campanha experimental realizada para caracterização física e mecânica dos varões de fibra de vidro. São descritos os materiais, os equipamentos utilizados e a preparação dos provetes para a solução salina utilizada. Por fim, procede-se à descrição de todos os procedimentos relativos a ensaios e a apresentação dos respetivos resultados.
- **Capítulo 4 - Comportamento de varões de GFRP em muretes de alvenaria:** É descrito o programa experimental, materiais e procedimentos, para a realização do ensaio de uma carga monotónica em muretes de alvenaria de tijolo cerâmico, com e sem varões de GFRP nas suas juntas horizontais. São apresentados os resultados obtidos.
- **Capítulo 5 - Análise e discussão de resultados:** Análise e interpretação dos resultados obtidos e comparação com resultados disponíveis na literatura.
- **Capítulo 6 - Conclusões e desenvolvimentos futuros:** Conclusões sobre o estudo realizado, comparação com objetivos propostos inicialmente e recomendações para possíveis estudos a realizar posteriormente.

Todas as figuras não referenciadas são da responsabilidade do autor.



## Capítulo 2

### Enquadramento do tema

#### 2.1. Introdução

Este segundo capítulo tem como objetivo apresentar uma contextualização do trabalho realizado, descrevendo o uso de compósitos reforçados com fibras (FRPs), particularmente dos compósitos reforçados com fibra de vidro, denominados de GFRP (do inglês, *Glass Fiber Reinforced Polymer*). É apresentada investigação bibliográfica relevante sobre a sua durabilidade e sua aplicação no sector da engenharia, destacando-se a aplicação de varões de GFRP em muretes de alvenaria de tijolo, caso de estudo no presente trabalho.

O presente capítulo começa por uma introdução histórica sobre os compósitos reforçados com fibras, passando pela sua importância ao correr do tempo e sua aplicação no ramo da engenharia civil. De seguida, são descritos os seus processos de produção, a sua composição, as suas vantagens e limitações e os aspetos de durabilidade, com ênfase nos perfis de GFRP.

Posteriormente, são apresentados os efeitos com que determinados fatores externos (como a humidade, temperatura e soluções aquosas) podem afetar as propriedades e a durabilidade do material em estudo.

Para finalizar, são apresentados resultados relevantes da investigação bibliográfica, passíveis de comparação com o estudo feito no presente trabalho.

#### 2.2. Compósitos reforçados com fibras

##### 2.2.1. História dos FRPs

As fibras naturais foram, desde muito cedo, usadas na história das civilizações, como se pode ler no livro do Êxodo 5:6-7 “*Nesse mesmo dia, o Faraó deu a seguinte ordem aos inspetores do povo e aos capatazes: ‘Não mais fornecereis ao povo palha para fazer tijolos como antigamente; que eles próprios a vão buscar’*” [8].

A utilização conhecida dos materiais compósitos recua até 800 a.C., se se considerar o uso de palha no fabrico de tijolos, processo usado pelos Israelitas. Mais tarde, nos anos 30 do séc. XX, nos Estados Unidos, começou por se recorrer a fibra de vidro em cimento. Contudo, o material compósito tal como atualmente conhecido só foi desenvolvido nos anos 40, no entanto, os polímeros só começaram a ganhar espaço depois da segunda guerra mundial, com a sua utilização na engenharia mundial. Começaram por ser usados em edifícios, barcos, radares, carros, circuitos elétricos, aviões, tubos e tanques de água. Contudo, um pouco antes da segunda guerra mundial terminar, em 1942, foi fabricado

o primeiro barco em fibra de vidro. Mais tarde, na década de 60, foram produzidas, pela primeira vez, fibras de boro e de carbono de elevada resistência, utilizadas em componentes de avião [9].

Os compósitos só apareceram mais tarde, tendo a sua primeira aplicação na construção ocorrido numa cúpula em Benghazi, em 1968. Todavia, foi em 1970 que, pela primeira vez na construção, surgiu o primeiro edifício totalmente construído com compósitos: Eye Catcher em Basileia, na Suíça. Estes compósitos não têm apenas sido utilizados em construção nova, mas também em reparações estruturais, como foi o caso da Ponte Ibach, em 1991, na Suíça. Em Portugal é possível ver a sua utilização em ambientes corrosivos como os passadiços técnicos do Oceanário de Lisboa

O processo de evolução sofre constantes avanços, sempre na procura de novos e melhores materiais, como refere [10]: *“O desenvolvimento sustentável é um processo em constante mudança e evolução no qual a exploração de recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e as mudanças institucionais estão em harmonia, aumentando o potencial do presente e futuro para satisfazer as necessidades e aspirações humanas”*.

Estes perfis de GFRP oferecem vantagens, quando comparados com os materiais tradicionais, tais como baixo peso e grande durabilidade o que os torna atrativos. No entanto, estão longe de ser o primeiro recurso devido à suas limitações e custo inicial.

### **2.2.2. Caracterização dos varões reforçados com fibras (FRP)**

Os FRPs resultam da combinação de materiais distintos, a resina que fazem a ligação dos componentes e distribui tensões e as fibras que confere a resistência ao compósito [12, 13]. Podem ser adicionados outros materiais para melhorar as características desejáveis ou apenas para reduzir custos de produção, tais como *fillers* ou aditivos. Os fatores que influenciam o comportamento destes compósitos são as propriedades mecânicas da resina da matriz, a orientação, comprimento e composição das fibras e a adesão do conjunto fibra/matriz. Neste contexto, estes compósitos são materiais não homogêneos e anisotrópicos, com o seu comportamento final dependente dos materiais de produção e processo de fabrico utilizado, sendo a pultrusão o método mais utilizado [14].

### **2.2.3. Tipos de resinas**

A matriz pode ser constituída por dois tipos de polímeros: polímeros termoplásticos e polímeros term endurecíveis. Os termoplásticos possuem componentes de fabrico potencialmente atraentes para os fabricantes (tais como, rápido processo de fabrico e prolongado tempo de vida) e não necessitam de refrigeração no processo de fabrico, o que os torna de fácil armazenamento. Possuem a vantagem de poderem ser facilmente reformulados, bastando apenas reaquecê-los - isso é vantajoso, porque os torna recicláveis; no entanto, devido à sua viscosidade e efeito memória característico, torna-se difícil a impregnação das fibras durante o processo de fabrico por laminação [15]. Estes polímeros têm normalmente maior ductilidade, sendo, por isso, mais resistentes a danos. O polipropileno, a poliamida, o polietileno e o polibutileno são exemplos deste tipo de polímeros [16].



No entanto, as resinas mais comuns no fabrico de FRP para uso na construção são as resinas termoendurecíveis, tais como [11, 12]:

- Poliéster
- Resina de vinil éster
- Poliuretano
- Epóxi

A matriz polimérica é o componente base na produção de FRPs, normalmente composta por uma resina termoendurecível e tendo como função ligar todos os componentes, fibras, aditivos ou *fillers*. No entanto, para além de agente ligante, possui outros papéis importantes no fabrico de varões, tais como [5, 6]:

- Proteger as fibras de ataques físicos e químicos;
- Agregar e assegurar orientação das fibras;
- Distribuir tensões de cargas exteriores pelas fibras;
- Evitar propagação de fissuras ao absorver energia e ao reduzir concentração de tensões.

No entanto, um dos principais critérios sempre a ter em conta é o custo de produção e de instalação em obra [12].

Na Tabela 2.1, apresentam-se algumas propriedades destas resinas. Sendo estas (termoendurecíveis) as mais utilizados no fabrico de varões, devido às suas vantagens.

Tabela 2.1 - Características das resinas termoendurecíveis utilizadas em compósitos reforçados com fibras [4]

<b>Características</b>	<b>Poliéster</b>	<b>Vinil éster</b>	<b>Epóxi</b>	<b>Fenólicas</b>
Resistência à tração [MPa]	20 – 100	68 – 82	55 – 130	30 – 50
Módulo de elasticidade [GPa]	2,1 – 4,1	3,5	2,5 – 4,1	3,6
Deformação na rotura [%]	1 – 6	3 – 4	1,9	1,8 – 2,5
Massa volúmica [g/cm <sup>3</sup> ]	1,0 – 1,5	1,2 – 1,1	1,1 – 1,3	1 – 1,3
Temperatura de transição vítrea [°C]	100 – 140	102 – 150	20 – 260	260

Na presente dissertação, os varões utilizados foram fabricados com uma resina de epóxi, usada desde os anos 40. Esta resina apresenta vantagens tais como a resistência à fluência, a forte aderência às fibras, a resistência química e a baixa retração durante a cura [4].

#### 2.2.4. Tipos de fibras

Como principal fonte do tipo de características mecânicas (nomeadamente, resistência, rigidez e estabilidade dimensional), as fibras são o ponto de partida do fabrico de FRPs para uma determinada aplicação. Estas fibras podem ser de diversos tipos: vidro (G), carbono (C), aramida (A) e kevlar (K). A escolha dependerá da sua futura utilização [4].

A função principal de cada fibra é o suporte das solicitações mecânicas a que a estrutura está sujeita - a resistência e a rigidez na direção com maior comprimento. Quando a estrutura está sujeita a uma carga exterior, a força é transferida para a *interface* fibra-matriz das fibras, que isoladamente são frágeis, ocorrendo roturas em pontos localizados (roturas que não se propagam devido à matriz). Essa matriz contém a propagação das roturas, tornando assim o conjunto mais resistente ao colapso e evidenciando ser de uma grande importância a definição de todos os materiais, a quantidade e a direção das fibras consoante o papel que irão desempenhar [13]. Na Tabela 2.2, apresentam-se algumas propriedades destas fibras de reforço.

Tabela 2.2 - Características das fibras mais utilizadas em compósitos reforçados com fibras [4]

Características	Vidro	Carbono	Aramida
Resistência à tração [MPa]	3500	3430 - 4900	3500
Módulo de elasticidade [GPa]	74	1,5 – 2,1	111
Deformação na rotura [%]	4,7	1,5 – 2,1	2,4
Massa volúmica [g/cm <sup>3</sup> ]	2,6	1,7 – 1,9	1,4
Diâmetro das fibras [μm]	3 - 13	6 – 7	12

Na presente dissertação, os varões utilizados foram fabricados com fibras de vidro (GFRP). Este tipo de fibras tende a degradar-se sempre que sujeita a ambientes de grande humidade e a temperaturas elevadas [4]. Neste contexto, foi uma condicionante a ter em conta na escolha dos ambientes de exposição realizados no presente estudo.

#### **2.2.5. Processo de fabrico de varões de FRPs**

O processo de fabrico requer um controlo cuidadoso para obter a correta orientação da fibra, o correto rácio fibra/resina, a correta compactação da fibra e o correto grau de cura. Deste modo, é necessário aplicar uma específica temperatura e pressão, o que pode ser feito através vários métodos de fabrico [18].

Existem vários processos de fabrico dos varões de GFRP, tais como: a pultrusão, uma das mais utilizadas atualmente, o enrolamento do filamento, processos de moldagem como o vácuo, a autoclave, a matriz combinada, a injeção de resinas, processos de fabrico à mão e processos para compósitos termoplásticos [4, 19].

Os polímeros termoendurecíveis são fabricados ao longo de várias fases: em primeiro lugar, infiltra-se a resina no reforço, enquanto ainda no estado solúvel e fusível; depois, passa-se ao processo de cura através de uma reação química de polimerização na presença de calor, passando o material a ser insolúvel e a ficar num estado irreversível. Tem mais vantagens sobre as termoplásticas, como a baixa viscosidade, a maior rigidez e a menor sensibilidade à temperatura de fabrico mais baixa [13]. Nas termoendurecíveis, destacam-se as de poliéster, de vinil éster, de epóxi e as fenólicas. Durante o

processo de fabrico dos FRPs, é necessário ter em conta a compatibilidade entre os materiais, nomeadamente entre a matriz e as fibras. Um fator a ter em conta é o da contração ou expansão relativamente à matriz e às fibras [12].

O processo de pultrusão é um processo de “puxar” e de “extrusão”. É muito eficaz porque permite aos fabricantes trabalhar em grande comprimento em contínuo, perfazendo perfis de grande comprimento e otimizando as suas características, elevando a sua resistência à corrosão e às químicas, sendo que estas fibras não enferrujam, não apodrecem e não escamam. O processo em si é composto por uma primeira parte, em que se puxa e desenha a fibra de vidro em filamentos contínuos através de uma resina líquida que satura o vidro; de seguida, esta combinação, vidro e resina, é puxada para um molde aquecido através de tração e, por fim, a massa endurece e forma uma matriz rígida. Com este processo, fabricam-se essencialmente barras de reforço GFRP [11].

### 2.2.6. Características dos FRPs

Os varões de FRP apresentam, tal como outros materiais, vantagens e limitações na sua composição. Quanto às vantagens [11, 12]:

- Resistência à corrosão;
- Resistência química;
- Ausência de condutividade;
- Leveza;
- Longo ciclo de vida;
- Transparência eletromagnética.
- Excelente comportamento em tração ( $\sigma_{tu,GFRP} = 852 \text{ MPa}$ );

As suas principais limitações:

- Requisitos de armazenamento;
- Suscetibilidade de danos por exposição aos raios UV;
- Degradação quando sujeitos à humidade prolongada e temperaturas altas;
- O custo inicial do reforço de FRP é consideravelmente superior ao do aço tradicional.

### 2.3. Caracterização dos polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP)

Os polímeros reforçados com fibras de vidro são obtidos mediante recurso à técnica de pultrusão, com a qual é possível obter varões e laminados de GFRP. As propriedades destes polímeros podem variar, dependendo das características dos materiais utilizados na sua constituição e na disposição de fibras, características que influenciam diretamente a sua resistência mecânica, física e química.

As características mecânicas são diretamente afetadas pela orientação final das fibras de reforço, apresentado um comportamento anisotrópico, sendo a resistência mais elevada na direção das fibras. Este polímero reforçado com fibras de vidro apresenta desvantagens, como a rotura da resina e a desagregação das fibras quando sujeitas a uma carga perpendicular ao sentido longitudinal das fibras.

Outra desvantagem é terem um módulo de elasticidade mais baixo do que o do aço ( $E_{t,GFRP} = 43,2 \text{ GPa}$  e  $E_{t,aço} = 210 \text{ GPa}$ ), sensíveis a temperaturas elevadas, apresentarem comportamento frágil e prejudiciais à saúde quando realizados cortes.

No entanto, dispõem de inúmeras vantagens em relação aos materiais tradicionais, destacando-se a condutibilidade térmica reduzida, o bom isolamento elétrico, térmico e magnético, a boa capacidade de absorver vibrações, a resistência à corrosão e o baixo custo em relação às outras fibras.

Assim, a utilização destes polímeros tem vindo a crescer no sector da construção, devido às suas características mecânicas, físicas e químicas que, no médio/longo prazo, compensam o investimento inicial.

### **2.3.1. Durabilidade dos varões de GFRP**

A durabilidade é a capacidade de um material, sujeito a condições diversas, resistir à degradação das suas características ao longo do tempo. O efeito dos fatores pode atuar de forma diversa, causando danos ao material [21]. Em estudos deste tipo, com um número elevado de amostras, poderá ser aplicada a Teoria de Arrhenius, que permite extrapolar resultados de forma objetiva. Esta Teoria pressupõe que a exposição de um material a uma temperatura durante um determinado período será equivalente à exposição (em laboratório) a uma temperatura superior durante um período mais curto, conseguindo-se assim fazer a extrapolação do laboratório para o caso real [38].

Segundo [21], a durabilidade de um material é definida pela capacidade de resistir à:

- Fendilhação;
- Oxidação;
- Degradação química;
- Delaminação;
- Desgaste e a danos provocados pelo contacto com outros materiais.

Estes varões de GFRP são constituídos por vários elementos, sendo os principais a matriz polimérica e as fibras de reforço. Qualquer um destes componentes pode ser suscetível a ataques por agentes externos, podendo ser afetados isoladamente ou em conjunto [20].

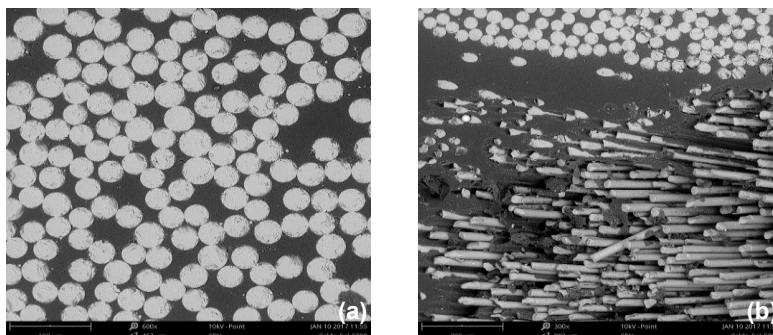
O mesmo autor [21] definiu que os principais fatores a potenciar uma maior degradação são:

- Soluções aquosas, humidade e ambientes alcalinos.
- Efeitos térmicos.
- Radiação ultravioleta (UV).
- Fogo e temperaturas elevadas.
- Fadiga.
- Fluência.
- Vazios e homogeneidade da resina

No estudo efetuado ao abrigo desta dissertação, foi analisado o comportamento dos varões em ambientes agressivos (nomeadamente, soluções aquosas salinas e alcalinas com temperaturas altas) e a sua deformação através de ensaios à flexão. Foram também analisadas em SEM amostras de GFRP, conseguindo verificar o efeito da degradação nas amostras ao nível de vazios e homogeneidade das amostras.

O estudo em ambientes aquosos é importante, uma vez que, na construção, os materiais estão constantemente expostos diretamente à humidade atmosférica, à chuva ou mesmo a condições que implicam a permanente imersão durante toda a sua vida útil (é o caso dos pilares de pontes ou infraestruturas marítimas). Essa absorção propaga-se por capilaridade entre as ligações fibra e matriz, provocando alterações nas suas características mecânicas, como a perda de resistência mecânica, alterações físicas da volumetria e alterações químicas como a reação de hidrólise. A absorção de água pode ocorrer por vários mecanismos, sendo o elo mais fraco e o primeiro a ser atacado a *interface* matriz/fibras ou a matriz, dependendo da coesão de ligação. A temperatura da água a que está sujeito o material vai influenciar a velocidade a que a água é absorvida [12].

Estevão [7] realizou um estudo de difusão molecular, análise SEM (Figura 2.1) e análise da temperatura de transição vítrea em varões de fibra de GFRP, com diâmetro de 10 mm, imersos num ambiente salino de concentração 50 g/L à temperatura ambiente. Obteve uma variação de massa máxima de 1,8% às 2500 horas, observando que existe uma lixiviação do material com o aumento do tempo de exposição, levando a uma maior absorção. Concluiu que os provetes demonstraram um comportamento Fickiano, tendo um crescimento inicial e depois estagnando, aproximando-se de um patamar horizontal. No seu estudo de SEM em amostras de GFRP, Figura 2.1, analisou o centro e periferia, às 2500 e 5800 horas, concluindo que a maior degradação é na *interface* resina/fibra na região do enrolamento espiral exterior.



(a) centro da amostra, exposição de 2500 horas; (b) periferia da amostra, exposição de 5800 horas; (c) centro da amostra, exposição de 5800 horas; (d) periferia da amostra, exposição de 5800 horas

Figura 2.1 - Imagens SEM de amostras de GFRP submersas no ambiente salino [7]

Na determinação da temperatura de transição vítrea, Estevão [7] obteve um aumento de 4% e 5% às 4500 horas comparando com a referência, no entanto, registou uma diminuição de 3% a 4% para 8400 horas quando comparando com as 4500 horas. Concluiu que o ambiente de exposição teve efeitos desprezáveis nas amostras de GFRP.

#### **2.3.1.1. Degradação da matriz**

Como o material que, neste caso de estudo, foi analisado (varões reforçados com fibras de vidro) é composto, sobretudo, por dois componentes (fibras e resina), torna-se necessário analisá-los, pois apesar de ser na matriz que aparecem os primeiros efeitos de degradação da difusão de humidade, estes podem ocorrer tanto nas fibras como na matriz ou na sua ligação [22].

Para os compósitos, é crucial analisar os efeitos da ação da água na degradação da matriz, já que os danos podem ser irreversíveis. Dependendo da temperatura de exposição, a humidade pode aumentar ou diminuir a integridade mecânica da matriz [23]. No caso dos compósitos de fibra de vidro, a absorção é inicialmente rápida, mas abranda no decurso do tempo, tendendo a estagnar se a exposição for prolongada [22].

Esta absorção de água em polímeros termoendurecíveis provoca uma plasticização que aumenta a mobilidade molecular, diminuindo as forças intermoleculares de coesão, resultando numa diminuição da temperatura de transição vítrea e tensão de rotura. No entanto, este processo tende a diminuir com o prolongar da exposição e poderá ser contrabalançado por efeitos de pós-cura da resina, recuperando as suas propriedades, como a temperatura de transição vítrea [24].

#### **2.3.1.2. Degradação das fibras de vidro**

As fibras, tal como a matriz, sofrem com a absorção de água, mas de modo diferente: a degradação ocorre devido à presença de moléculas de água que alteram a estrutura molecular das fibras, reduzindo as suas propriedades. Ao desenvolverem-se fissuras, estas favorecem a absorção capilar da água, o que origina o aparecimento de fendas com o aumento da tensão chegando à rotura das fibras [12]. A velocidade de deterioração das fibras depende da concentração da solução, da temperatura do ambiente de exposição e do tempo de imersão [25].

#### **2.3.1.3. Degradação na matriz/fibra**

O estudo da presença de degradação revela-se de grande importância para a durabilidade dos compósitos expostos a ambientes extremos, afetando diretamente a aderência entre o conjunto, contribuindo para a perda de resistência mecânica e de rigidez de flexão dos compósitos [26]

Com recurso ao microscópico eletrónico (SEM), Liao *et al.* [25] analisou provetes de GFRP sujeitos a ambientes aquosos. A conclusão foi que a degradação da interface influenciou, em grande parte, a perda de resistência. Estudaram também a degradação pela ação de soluções salinas com concentrações de 5% e 10%, registando que ocorreu uma degradação das propriedades mecânicas, mas não de forma significativa o que levou a concluir que a concentração não afetou a degradação dos varões. Realizaram também um envelhecimento de compósitos reforçados com fibras de vidro (GFRP) em soluções salinas a 20°C e 75°C, até 6570 horas. Para os 20°C, registaram perdas da rigidez de flexão na ordem de 5 a 13%, caracterizadas como pouco significativas. Para os 75°C, registaram uma perda de resistência na ordem dos 40%, que classificaram como significativa.

#### 2.3.1.4. Efeitos da temperatura nos GFRP

Os materiais estudados estão sujeitos a variações térmicas durante a sua vida útil, sejam temperaturas negativas ou positivas elevadas ou até mesmo exposição solar [26]. A exposição do material a estas variações ou constantes diferenças acima da temperatura de cura leva a uma degradação da matriz ou da interface, o que torna necessário um aprofundamento do estudo no sentido de se perceber a sua dimensão e processos de degradação, na tentativa de os diminuir [27].

Crea *et al.* [28] analisaram a degradação das características mecânicas de provetes de GFRP quando sujeitos a temperaturas elevadas, nomeadamente 200, 250, 300, 325 e 350°C. Com a análise dos resultados, observaram que a tensão de rotura à tração decresce com o aumento da temperatura. No caso do módulo de elasticidade, verificaram um aumento à menor temperatura (200°C), atribuído, principalmente, ao incremento das ligações químicas na matriz. Contudo, com o aumento da temperatura de exposição dos provetes, observaram, de forma análoga à tensão última, uma degradação do módulo de elasticidade.

Robert *et al.* [29] analisaram provetes de GFRP sujeitos a temperaturas de 60°C, tendo verificado que o compósito possuiu uma capacidade superior de absorção de água quando comparado com o sucedido a temperaturas inferiores. Contudo, esta absorção foi acompanhada de uma perda de massa devida a reações químicas do conjunto (GFRP e ambiente de exposição). Verificou ainda que, entre os 20°C e os 50°C, a degradação é linear, sendo que aos 60°C se verificou uma maior diminuição da capacidade resistente. Concluiu que esta degradação aconteceu em virtude de a expansão da resina ter provocado uma diminuição da densidade do material, aumentando assim a porosidade e a capacidade de absorção de humidade.

Silva [30] realizou um ensaio mecânico de resistência à flexão em varões de GFRP, com uma solução em ambiente salino com uma concentração de 35 g/l, para as temperaturas de 20 e 60°C, durante 3, 6 e 9 meses. Na Tabela 2.3, estão representadas as propriedades mecânicas (nomeadamente, tensão de rotura, deformação na rotura e módulo de elasticidade) para a imersão dos varões a 20°C.

Na Tabela 2.3, estão representadas as propriedades mecânicas para a imersão dos varões a 60°C. Concluiu que a temperatura teve influência na degradação das características mecânicas dos varões de fibra de vidro.

Tabela 2.3 - Resultados médios obtidos para varões de GFRP sujeitos a um ambiente salino, com uma temperatura de 20°C e 60°C [30]

Meses de imersão	Temperatura de exposição	$\sigma_f$ [MPa]	$\varepsilon_f$ [%]	$E_f$ [GPa]
3	20°C	430,6	2,3	16,2
	60°C	396,9	2,6	14,5
6	20°C	447,1	2,6	18,8
	60°C	372,1	2,4	16,0
9	20°C	424,8	2,7	18,3
	60°C	357,1	2,4	18,2

Hristozov *et al.* [31] realizaram testes de absorção de água para varões de GFRP sujeitos a ambientes agressivos, nomeadamente em água salgada com concentração de 3,50% e em soluções alcalinas com pH de 12,5. As soluções foram analisadas para três temperaturas diferentes (20, 50 e 60°C) às 500, 1000, 2000 e 3000 horas. Na Figura 2.2, é possível observar que os resultados da absorção de água demonstraram que a fibra de vidro registou, após 3000 horas, um aumento de massa de 2,1, 4,9 e 4,1% para 20, 50 e 60°C, respetivamente. Constataram que, para 60°C, quando comparado com 50°C, existiu uma diminuição da variação de massa devido à perda de massa ser superior ao respetivo ganho.

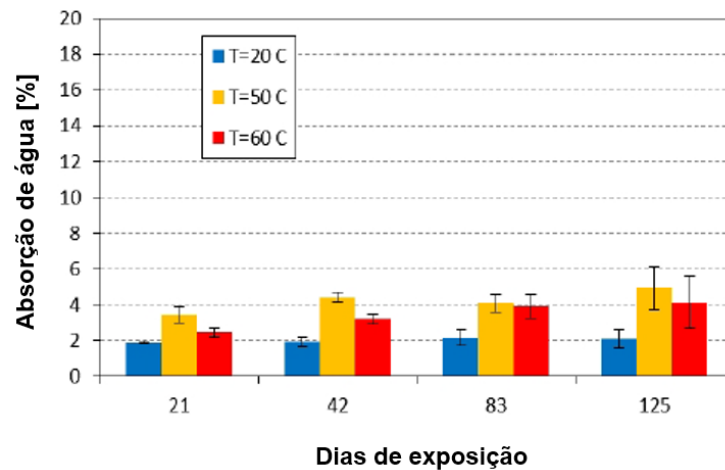
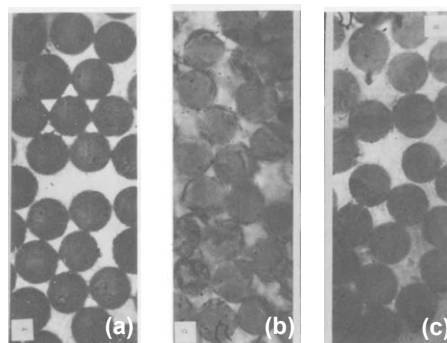


Figura 2.2 - Absorção de água em varões de GFRP [31]

Ishai [32] realizou um ensaio laboratorial em varões de GFRP imersos em água a temperaturas de 22°C e 105°C durante 864 horas, analisando a absorção de água e degradação existente através do ensaio SEM (Figura 2.3). Verificou que as amostras sujeitas a temperaturas altas sofreram degradação acentuada desde o início da exposição e perda significativa de massa, quando comparadas com as amostras sujeitas às águas mais frias e amostras de referência. Nas imagens SEM (Figura 2.3) verificou que o contorno das fibras mostrou degradação (Figura 2.3 (c)), e que por outro lado as amostras sujeitas a 22°C mostraram contornos circulares suaves (Figura 2.3 (b)) semelhante às amostras de referência (Figura 2.3 (a)). Concluiu que a degradação começou pela penetração da água entre a matrix/fibra e foi seguida com o ataque às fibras de vidro, levando a um destacamento e lixiviação das mesmas.



(a) amostra de referência; (b) amostra exposta a 22°C com 864 horas; (c) amostra exposta a 105°C com 864 horas

Figura 2.3 - Imagens transversais de amostras de GFRP analisadas em SEM [32]



## 2.4. Compósitos reforçados com fibras utilizados em alvenarias

Os compósitos reforçados com fibras já estão presentes, desde os anos 70, no reforço ou reparação de estruturas na construção. Contudo, é necessário compreender qual o seu impacto nas variadas formas, sejam mantas, barras ou varões, quando utilizados nos vários processos construtivos.

Laursen *et al.* [33] reforçaram paredes de alvenaria de 1830 x 1830 x 152 [mm] com laminados CFRP e GFRP realizaram ensaios com aplicação de cargas no plano (ao corte) e fora do plano (à flexão) das paredes. Ensaíram as paredes de referência até à rotura, seguindo à sua reparação e reforço com resina epóxi e laminados de CFRP, de ambos os lados, ensaiando novamente. Verificaram que o modo de colapso se alterou, passando de uma rotura por corte para uma rotura dúctil por flexão, e que apenas com o reforço dobrou a capacidade de deformação - Figura 2.4.

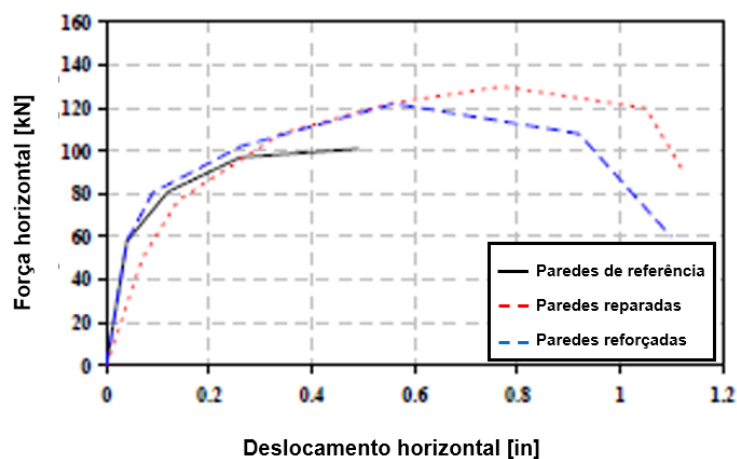


Figura 2.4 - Diagrama de força-deslocamento de ensaios em paredes de alvenaria [33]

Ehsani *et al.* [34] analisaram três paredes de alvenaria com 1220 x 710 x 50 [mm] reforçadas com uma densidade de 20 a 75 % (S20, S25, S30, S40 e S75 a figura seguinte) de tiras verticais de GRFP, sujeita a uma carga fora do plano da parede, ou seja, uma carga aplicada no eixo vertical perpendicular à parede. Na Figura 2.5, é possível ver os resultados obtidos no qual a parede tinha um rácio altura/espessura de 14 e resistiu a um máximo de 32 kPa com uma deslocamento de 17 mm para um densidade de 75 % de reforço. Os autores do estudo concluíram que as paredes usadas conseguiram resistir a uma carga lateral de 10 a 32 vezes o seu peso por área de superfície, e uma deformação de apenas 2,5 % da sua altura. A rotura nas paredes reforçadas e nos não reforçadas foi dada como rotura frágil.

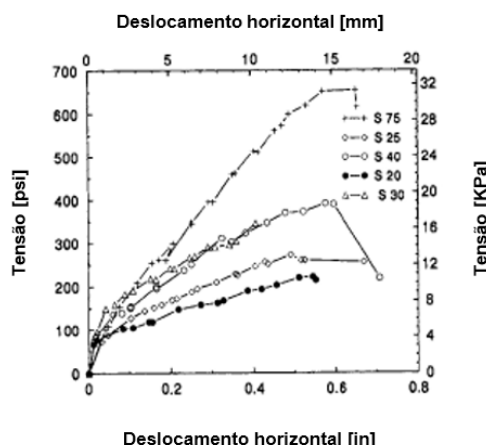


Figura 2.5 - Diagrama de resultados dos ensaios em paredes de alvenaria [34]

Hamilton *et al.* [35] realizaram ensaios em seis paredes com o objetivo de testar a capacidade de flexão com carga monotônica fora do plano da alvenaria. As paredes possuíam dimensões de 1800 x 610 x 200 [mm] e estavam reforçadas com varões de fibras de vidro orientadas perpendicularmente às juntas. Os resultados indicaram que a resistência à flexão das paredes reforçadas com GFRP foi controlada por vários fatores, tais como: rotura dos GFRP's, corte do tijolo ou na ligação GFRP-alvenaria.

Hamoush *et al.* [36] realizaram uma investigação com carga fora de plano em paredes reforçadas com varões de GFRP e paredes não reforçadas (URM) com dimensões de 1200 x 1800 x 200 [mm]. Observaram que o reforço externo de paredes aumenta a resistência à flexão. Concluíram que a resistência ao corte dos sistemas de paredes de alvenaria exerce uma influência determinante sobre o modo de rotura do sistema, devido ao facto de se ter verificado um colapso, na maioria das paredes testadas, por corte na conexão fibra-alvenaria. Verificou-se que os varões aplicados no reforço possuíam defeito de fabrico, como bolhas ou fraca conexão matriz/fibras, resultando em rotura dos varões e forças de corte na ligação argamassa-reforço levando ao seu destacamento.

Nanni *et al.* [37] realizaram testes em paredes com encastramento, medindo 1,22 m de comprimento, 0,61 m de altura e com uma espessura de 0,95 m. Foram construídas paredes de referência sem reforço de varões de GFRP e com reforço de varões (localizados no eixo vertical das juntas, com cinco extensómetros, de modo a conseguir monitorizar as tensões no varão). O ensaio contemplou uma carga fora do plano em cada modelo de parede - ver Figura 2.6.

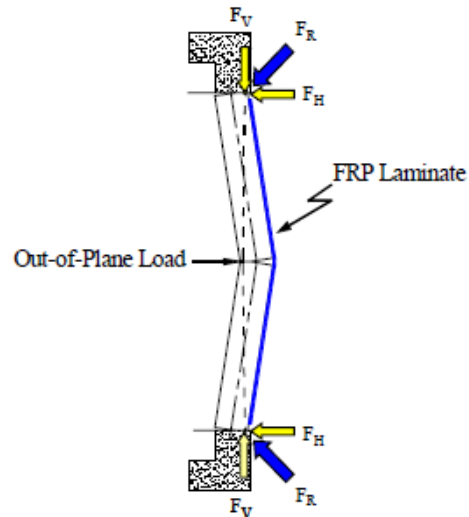


Figura 2.6 - Modelo de ensaio em muretes de alvenaria [37]

Nanni *et al.* [37] registaram três modos de falha: por flexão; por corte do tijolo (nos suportes). Verificou-se uma rotura por flexão devido a dois fatores (depois do aparecimento de fissuras nas juntas entre argamassa e o tijolo): à rotura do GFRP ou corte do tijolo, dependendo da percentagem de reforço. Foi observado um mecanismo de falha que não é normalmente comum em laboratório: corte do tijolo nos suportes devido às condições de apoio utilizadas (encastramento), o que controlou o comportamento da parede durante o ensaio. A rotura por corte foi observada em conjunto com a rotura por flexão e fissuras verticais, levando ao efeito arco (do inglês, *arching effect*). Os autores concluíram que o aumento do reforço não teve influência na carga última, apenas aumenta a rigidez, reduz a flexão e diminui a ductilidade da parede.

Tan *et al.* [38] elaboraram um programa experimental em paredes de 1000 x 1000 x 110 [mm] reforçadas com FRPs (nomeadamente: GFRP, CRFP e malha de fibra de vidro), às quais aplicaram uma carga perpendicular ao seu plano como se pode observar na Figura 2.7 (a). Demonstrou-se que existiu um incremento de resistência fora plano e que a capacidade de carga foi aumentada com o incremento da espessura dos FRPs. Os autores registaram quatro modos de rotura: corte do tijolo cerâmico (Figura 2.7 (b)); esmagamento do tijolo cerâmico (Figura 2.7 (c)); rotura dos FRPs (Figura 2.7 (d)); falha por flexão devido ao descolamento dos FRPs.

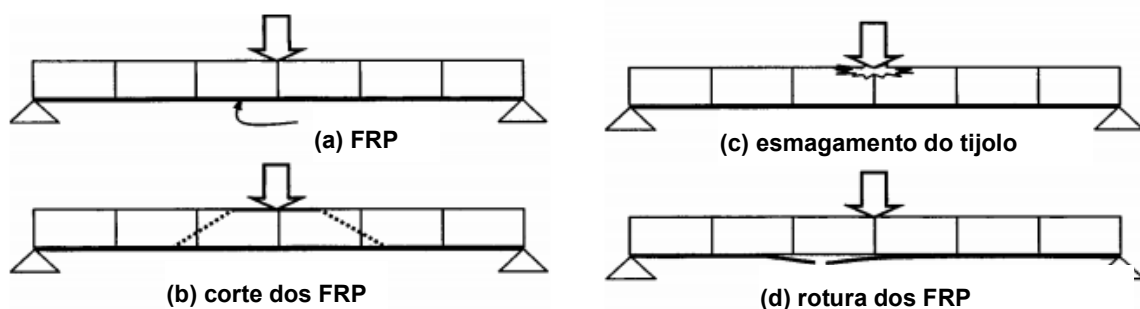


Figura 2.7 - Modelo de ensaio em muretes de alvenaria reforçados com GFRP [38]



## Capítulo 3

### Caracterização dos varões de GFRP

#### 3.1. Introdução

O primeiro objetivo da investigação realizada foi a análise do comportamento mecânico e físico dos varões de GFRP quando expostos a condições extremas, como ambientes aquosos e diferenças de temperatura, que são frequentes na construção.

O presente capítulo descreve a organização da campanha experimental realizada, incluindo a descrição pormenorizada dos métodos de ensaio suportados pelas respetivas normas e a preparação de amostras e ambientes de exposição, com o objetivo de caracterizar os varões de GFRP.

#### 3.2. Caracterização dos materiais

Neste capítulo, são descritos e caracterizados os materiais utilizados durante a campanha experimental: varões de fibra de vidro (GFRP) e a resina utilizada para selar os topos dos mesmos.

##### 3.2.1. Varões de GFRP

Os varões de fibra de vidro utilizados (Figura 3.1) foram adquiridos à empresa FYFE CO, LLC, sendo varões pré-fabricados com fibras de vidro de alta resistência em conjunto com uma resina termoendurecível de epóxi extremamente durável. Para o presente estudo, foram utilizados varões com um diâmetro de 9,5 mm e um comprimento de 1 m. As fibras são alinhadas na direção longitudinal, existindo uma camada exterior, enrolada em espiral, que confere maior capacidade de aderência e proteção ao varão - Figura 3.1.



Figura 3.1 - Varões de GFRP

Os varões de GFRP foram mantidos à temperatura ambiente no DEC da FCT NOVA até à exposição realizada no presente estudo. São todos do mesmo fabricante (FYFE CO, LLC) e do mesmo lote, o que confere um maior rigor de resultados para o estudo realizado.

Na Tabela 3.1, são apresentadas as características, fornecidas pelo fabricante, consideradas mais importantes para comparação no estudo elaborado. A ficha técnica completa fornecida pelo fabricante dos varões de GFRP encontra-se no anexo A.

Tabela 3.1 - Características geométricas e mecânicas à flexão dos GFRP

Diâmetro [mm]	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à flexão [MPa]
9,5	49,5	929

### 3.2.2. Resina S&P Resin 55

A resina foi utilizada para a selagem dos topos dos varões de fibra de vidro, de forma a serem imersos nos ambientes de exposição. A resina utilizada é à base de dois componentes e tem a designação de *S&P Resin 55* - Figura 3.2. No anexo B, encontra-se a ficha técnica da resina utilizada.



Figura 3.2 - Preparação da resina para selagem dos varões de GFRP

### 3.3. Envelhecimento acelerado de varões de GFRP

Na presente secção é descrito a preparação das amostras, os equipamentos de leitura e controlo e os ambientes de exposição utilizados para imersão das amostras de GFRP.

Para a definição dos ambientes foi necessário ter em conta alguns fatores, devido a existirem vários ambientes aos quais o material poderá estar sujeito durante o seu período de vida na construção. Foram definidos dois ambientes, ainda não estudados no DEC da FCT NOVA, possivelmente prejudiciais à durabilidade dos varões de GFRP. Ambos os ambientes são aquosos, com uma concentração de cloreto de sódio de 50 g/l, estando um à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C) e outro a 60°C. Serviu de referência o facto de que a absorção de água e a temperatura alta são fatores de degradação do material estudado, sendo acrescentada a salinidade. Procedeu-se com estes ambientes a um envelhecimento acelerado, colocando os varões de GFRP imersos nas soluções.

### 3.3.1. Preparação das amostras

Para a imersão dos varões, foi necessário selar os topos dos mesmos com resina, descrita na secção anterior, como se pode observar na Figura 3.3, minimizando a infiltração de água. Os varões utilizados foram de resina epóxi (amarelada).

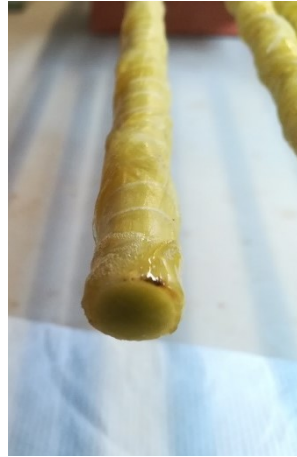


Figura 3.3 - Colocação de resina nos topos dos varões de GFRP

### 3.3.2. Equipamentos

Um aspeto fundamental a ter em conta em ambientes de exposição com temperaturas elevadas é o facto de que não existem sistemas isolados perfeitos, pelo que foi importante o controlo e monitorização dos ambientes utilizados. O ensaio foi realizado a 60°C, existindo evaporação, o que prejudicou a concentração de cloreto de sódio e a própria imersão dos provetes, ao reduzir o nível de água. Assim, para as condições de exposição definidas se manterem constantes ao longo do período de exposição, foram realizados controlos diários dos níveis de água e da concentração de cloreto sódio, com o apoio dos seguintes equipamentos:

- Termóstato e resistência elétrica
- Medidor de salinidade
- Termómetro

O termóstato com resistência elétrica - Figura 3.4 (a) - permite garantir a temperatura adequada para o ensaio - neste caso, foi de 60°C; o medidor de salinidade com precisão adequada - Figura 3.4 (b) - de modo a controlar a concentração de cloreto de sódio; o termómetro para verificar a temperatura nos ambientes de exposição - Figura 3.4 (c).



(a) termóstato; (b) medidor de salinidade; (c) termómetro

Figura 3.4 - Equipamentos de controlo dos ambientes de exposição

### 3.3.3. Ambientes de exposição

Os ambientes definidos foram a imersão em água salgada com diferentes temperaturas. Estes foram considerados importantes devido à aplicação dos varões de GFRP poder ser feita em ambientes salgados, com é o caso das zonas costeiras e marítimas de Portugal. Contudo, a exposição à humidade e a temperaturas elevadas são fatores favorecem a degradação deste tipo de compósitos. Assim, conjugando todos estes fatores, definiram-se os ambientes de exposição para estudo da degradação física e mecânica das amostras de GFRP.

Simularam-se para os ambientes, duas soluções salinas com uma concentração de 5% de cloreto de sódio (ou seja, 50 g por cada litro), mas com temperaturas de exposição diferentes: uma a 60°C e outra à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C), como se demonstra, em síntese, na Tabela 3.2.

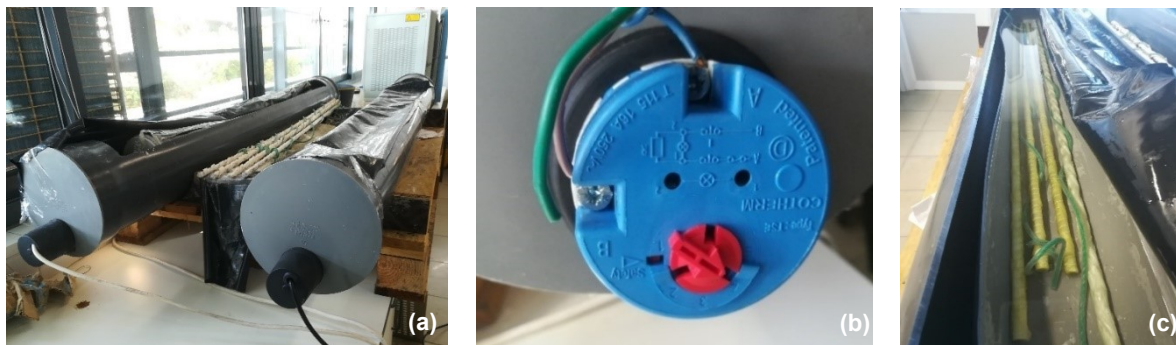
Tabela 3.2 - Ambientes de exposição

Características	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Concentração	50 g/l NaCl	50 g/l NaCl	2,4g/l NaOH + 19,6 g/l KOH + 2 g/l Ca(OH) <sub>2</sub>
Temperatura	60°C	20°C	60°C

A solução 3, ambiente alcalino, foi realizada anteriormente ao presente estudo. Esta solução foi utilizada para o envelhecimento dos varões colocados nos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico, como irá ser explicado posteriormente.

Na Figura 3.5, pode-se observar os ambientes de exposição e os materiais utilizados para imersão dos varões de GFRP, a saber: tubos de PVC (um com 200 mm - Figura 3.5 (a) - e outro com 100 mm, colocado no interior do anterior); um termóstato no topo de cada tubo de 200 mm, como se pode observar na Figura 3.5 (b), que controlou a temperatura sempre que necessário mantendo nos 60°C: uma corda - Figura 3.5 (c) - de modo a evitar o contacto entre varões; uma lona em cada abertura da tubagem, para proteger as amostras e minimizar perdas de calor dentro dos tubos, como se pode observar na Figura 3.5 (a) e (c).





(a) esquema do recipiente para imersão dos varões de GFRP nos ambientes de exposição; (b) termóstato; (c) corda para separação de varões de GFRP;

Figura 3.5 - Recipiente de imersão dos varões de GFRP nos ambientes de exposição

Nestes recipientes foram imersos 4 varões de GFRP com 1 m de comprimento, imersos em cada ambiente de exposição - Tabela 3.3. Os provetes foram pesados periodicamente, de modo a registar a perda e ganho de massa. Para a caracterização mecânica dos varões de GFRP, foram realizadas várias análises, tais como: ensaio à flexão, análise com o microscópio de varrimento eletrónico (SEM) e determinação da temperatura vítrea ( $T_g$ ), tal como se descreve na secção seguinte.

Tabela 3.3 - Número de varões de GFRP utilizados em cada ambiente de exposição

Amostra		Ambientes de exposição	
		Solução 1	Solução 2
Varão GFRP	$\varnothing = 9,5 \text{ mm}$ , $L = 1000 \text{ mm}$	4	4

### 3.4. Caracterização de varões de GFRP

Na presente secção são descritos o métodos e equipamentos utilizados para análise da influência dos ambientes agressivos nos varões de GFRP, a saber;

- Difusão molecular das soluções nas amostras
- Ensaio de flexão
- Microscópio eletrónico de varrimento (SEM)
- Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ).

Os ensaios mencionados foram realizados para amostras com 0, 1500, 3600 e 5000 horas de exposição, podendo comparar-se entre si, considerando o seu estado de degradação. Para o ensaio de flexão foram realizados 33 ensaios. A análise SEM foi realizada com corte transversal e longitudinal ao sentido das fibras, conseguindo-se assim avaliar a degradação na periferia e no interior de cada varão, em vários tempos de envelhecimento e comparar com os resultados obtidos por Estevão [7]. A determinação da  $T_g$  foi realizada nos GFRP's de modo a identificar o tipo de influência que o ambiente de exposição pode produzir na composição dos varões, nomeadamente, as temperaturas altas e o ambiente salino.

Na Tabela 3.4, apresenta-se uma síntese do número de provetes que foram testados para cada ensaio de caracterização. Na secção seguinte são descritos detalhadamente os ensaios realizados nas amostras de GFRP.

Tabela 3.4 - Quantidade de amostras de GFRP analisadas

Ensaio	Tempo de exposição [h]				Varões dos muretes	
	0	1500	3600	5000	MVR	MVE
Flexão	3	6	6	6	6	6
SEM	1	2	2	2	-	-
Tg	2	4	4	4	-	-

MVR - Murete de alvenaria de tijolo cerâmico com dois varões de GFRP; MVE - Murete de alvenaria de tijolo cerâmico com dois varões de GFRP sujeitos ao ambiente alcalino

### 3.4.1. Difusão molecular das soluções nas amostras de GFRP

Os materiais têm como característica comum a porosidade e a capacidade de absorver humidade, o que leva à incorporação de moléculas de água. Não sendo os varões de GFRP um material diferente, é importante proceder-se a uma análise da difusão molecular, devido ao facto de que a penetração de fluidos é conducente à quebra de ligações na resina e à diminuição das propriedades mecânicas dos varões. Assim, a difusão assume um papel importante nas propriedades dos compósitos, o que faz com que o presente estudo se revista de extrema importância.

Para este ensaio, foi necessário proceder à pesagem dos varões de GFRP sujeitos aos ambientes de envelhecimento acelerado. Para tal, preparou-se previamente os varões para o ensaio à flexão, foram cortados provetes com 25 cm e selados nos topos com resina (para minimizar o nível de absorção provocado pelo desgaste causado no corte). A pesagem consistiu em retirar periodicamente os provetes dos ambientes de exposição, remover a água superficial não difundida com o material e medir a massa correspondente. Estas etapas foram realizadas no laboratório de materiais da FCT NOVA numa balança Mettler Toledo modelo PR1203, com precisão de 0,001 g.

Para o cálculo da percentagem absorvida, foi utilizada a seguinte equação:

$$M_t = \frac{w_t - w_i}{w_i} \times 100 \quad (3.1)$$

Em que:

$M_t$  percentagem de água absorvida ao tempo  $t$

$W_i$  peso do provete

$W_t$  peso do provete no tempo  $t$

A difusão molecular (e assumindo que a absorção nas amostras de GFRP segue a lei de Fick) pode ser obtida, para o segmento inicial linear, através da seguinte expressão [39]:

$$\alpha = \frac{\pi R^2}{16} \left( \frac{M_2 - M_1}{M_m} \right)^2 \left( \frac{1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (3.2)$$

Em que:

- $\alpha$       coeficiente de difusão (m<sup>2</sup>/s)
- R      raio do provete
- M<sub>2</sub>      ganho de massa para tempo t<sub>2</sub>
- M<sub>1</sub>      ganho de massa para tempo t<sub>1</sub>
- M<sub>m</sub>      ganho de massa no final do segmento linear
- t<sub>2</sub>      tempo do segundo registo de massa absorvida
- t<sub>1</sub>      tempo do primeiro registo de massa absorvida

Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 3.5, para a variação de massa nos varões de GFRP sujeitos a ambientes agressivos. Observa-se que o ambiente com a temperatura mais elevada teve influência no ganho de aumento de massa nos provetes.

Tabela 3.5 - Resultados médios da massa acumulada nos varões de GFRP imersos nos ambientes de exposição

Ambientes	Tempo de exposição [h]	Massa acumulada [%]
Salino 20°C	1500	1,61
	2160	2,00
	2500	3,03
	2880	2,92
	3072	2,99
	3288	3,05
	4776	3,13
Salino 60°C	1500	2,70
	2160	2,75
	2500	3,19
	2880	3,17
	3072	3,21
	3288	3,29
	4776	3,25

Na Figura 3.6 representa-se o diagrama da variação de massa das amostras sujeitas ao ambiente salino a 20°C, verifica-se que existiu uma absorção inicial acentuada seguida de uma estagnação, portanto assume-se que os provetes de GFRP chegaram ao seu ponto de saturação, sensivelmente às 2500 horas. Observa-se ainda no diagrama da variação de massa das amostras sujeitas ao ambiente salino a 60°C, que de forma análoga às amostras anteriores, registou um declive inicial elevado seguido de um patamar de estagnação às 2500 horas.

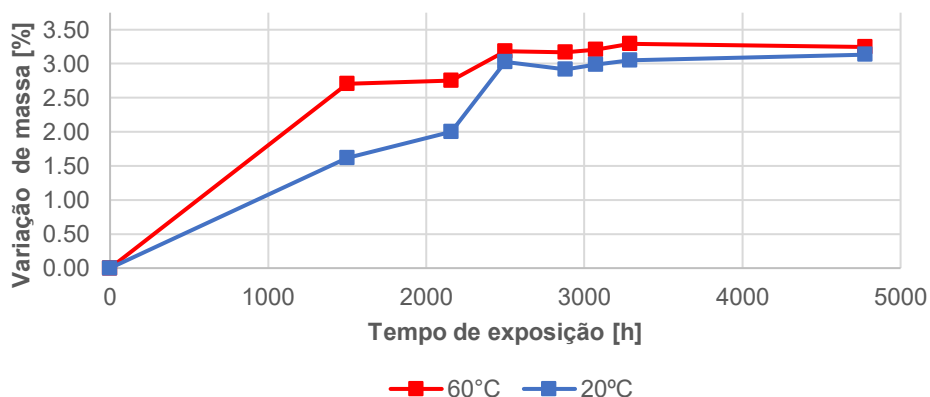


Figura 3.6 - Ganho de massa acumulado nos varões de GFRP imersos na solução salina a 20°C

Comparando os comportamentos das amostras dos dois ambientes, verifica-se um segmento de absorção inicial elevado, seguido de estagnação. No entanto, as amostras sujeitas à temperatura mais elevada registaram um ganho de massa superior.

Na Figura 3.7, mostram-se os provetes após serem retirados dos ambientes de exposição, observando-se uma variação da cor amarelada das amostras de referência (REF na Figura 3.7) para uma cor acastanhada das amostras de GFRP sujeitas a ambiente salino ambiente de 60°C. Nas amostras sujeitas ao ambiente de 20°C verifica-se uma perda de coloração tornando as amostras mais brancas do que a cor original (REF).



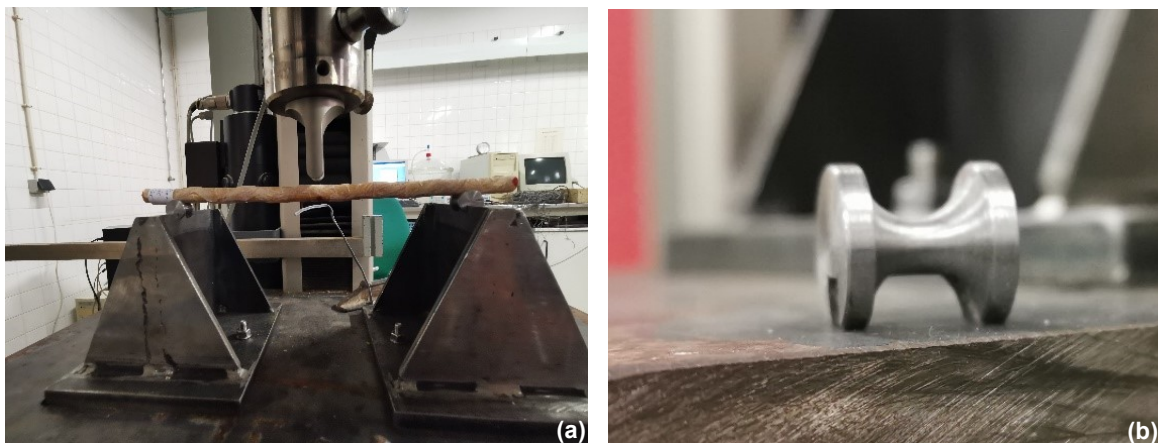
Figura 3.7 - Amostras de GFRP após imersão nos ambientes de exposição

### 3.4.2. Ensaio de flexão em varões de GFRP

As características mecânicas de um material são um elemento fundamental para o estudo da durabilidade de compósitos, particularmente no que diz respeito à utilização de GFRP como reforço de estruturas. Assim, considerou-se importante analisar os efeitos que determinados ambientes de exposição utilizados no presente estudo produziram na resistência dos varões.

Os ensaios à flexão dos varões de fibra de vidro foram realizados no departamento de engenharia civil da FCT NOVA, recorrendo à máquina de compressão ZWICK, tendo como referência a norma internacional ASTM D4476 – 09 [40]. Este ensaio teve como objetivo a determinação da resistência à flexão, da deformação última e do módulo de elasticidade dos varões sujeitos aos ambientes de exposição salino a 20°C e 60°C e alcalino a 60°C (e no seu estado original).

Foram realizados ensaios de flexão de três pontos, com uma distância entre apoios de 200 mm, utilizando provetes com 250 mm de comprimento e 9,5 mm de diâmetro. Para o apoio dos provetes, foi necessário dimensionar peças com indicação normativa ASTM D4476 – 09 [40], (as peças metálicas na Figura 3.8 (a), para cumprir a distância entre apoios, e, na Figura 3.8 (b), dispositivo para o apoio dos provetes durante o ensaio. No anexo C encontra-se o dimensionamento das peças metálicas.



(a) apoio para ensaio de flexão segundo a norma D4476-03; (b) dispositivo para apoio de varões segundo a norma D4476-09 [40];

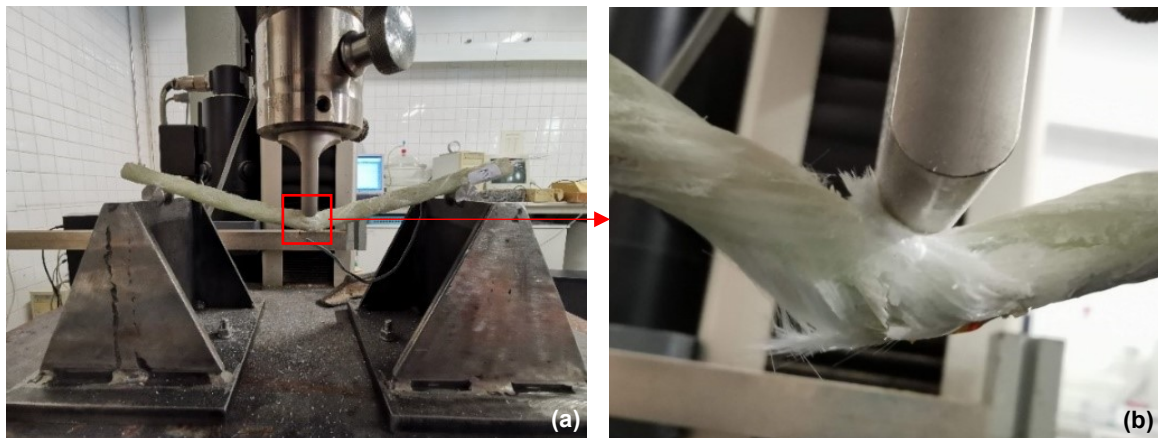
Figura 3.8 - Ensaio de flexão em varões de GFRP

Para a preparação dos provetes, foi necessário efetuar um corte com comprimento de 250 mm e colocar um extensómetro, como se pode ver na Figura 3.9. Este extensómetro foi colocado a meio do vão do provete, na fibra inferior à aplicação da carga, conseguindo-se assim registar a extensão na fibra ao longo de todo o ensaio, através de uma unidade de aquisição de dados, um spyder8 da marca HBM. Foram preparadas 3 amostras para cada tempo de exposição e referência, nomeadamente: referência e 1500, 3600 e 5000 horas para os dois ambientes (tanto para a temperatura ambiente como para a de 60°C), sendo que a ambos se aplicou a solução salina de 5% NaCl. Foram preparadas também 3 amostras dos varões colocados em cada murete (MVR e MVE), num total de 12, provetes que foram sujeitos a um ambiente alcalino de 60°C durante 5184h.



Figura 3.9 - Preparação de provetes de GFRP para ensaio de flexão

A velocidade de aplicação da carga, como recomenda (para este diâmetro) a norma internacional D4476 – 03 [40], foi de 6 mm/min, garantindo-se que o ensaio decorria de 20 a 200 segundos. O provete foi devidamente centrado com o extensómetro abaixo do ponto de aplicação da carga e iniciou-se o carregamento até a rotura do mesmo, obtendo-se assim as grandezas para o estudo das propriedades de flexão. Na Figura 3.10 é possível ver o estado final dos provetes.



(a) Estado do provete de GFRP; (b) Estado do provete de GFRP a meio vão

Figura 3.10 - Estado do provete após ensaio de flexão

Para o cálculo da tensão de flexão  $\sigma_f$  e da deformação associada  $\varepsilon_f$ , calculou-se o seguinte:

$$\sigma_f = \frac{M}{I} y \quad (3.2)$$

Em que,

- $\sigma_f$       Tensão em flexão (MPa)
- M        Momento fletor em flexão
- I        Momento de inércia à flexão da secção transversal
- y        Distância da linha neutra à fibra exterior



A tensão de flexão de rotura máxima  $\sigma_f$  foi definida com o valor máximo registado durante o ensaio, assim como a deformação de rotura  $\varepsilon_f$  e o módulo de elasticidade  $E_f$ . O cálculo do módulo de elasticidade, sendo um valor de avaliação da rigidez do material ensaiado, foi importante para a caracterização das amostras. Este foi calculado através da regressão linear entre dois pontos do diagrama tensão-deformação de cada amostra, sendo o módulo de elasticidade o declive da reta.

De seguida, na Figura 3.11, está representado o diagrama de tensão-extensão para as amostras de GFRP de referência - ou seja, com 0 horas de exposição, sendo um diagrama tipo dos resultados obtidos. Os resultados individuais encontram-se no Anexo D.

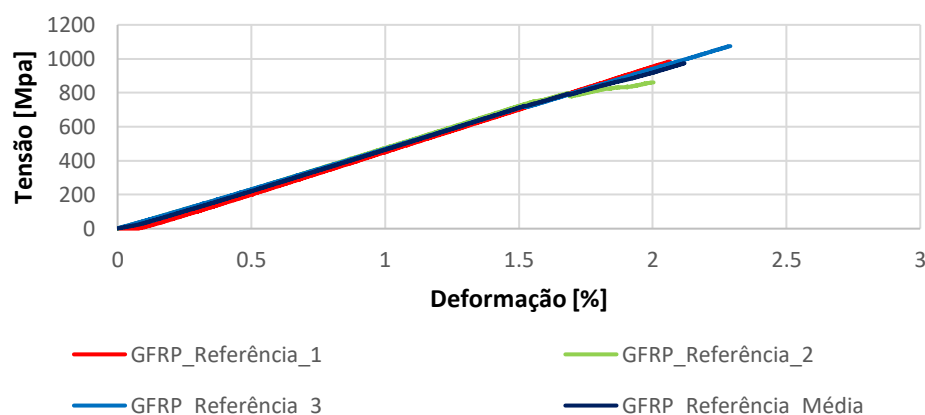


Figura 3.11 - Diagrama tensão-deformação das amostras de varões de GFRP de referência

Na Tabela 3.6, estão representados os ensaios médios obtidos nos ensaios de flexão realizados nas amostras de varões de GFRP para os vários tempos e ambientes de exposição. Pode-se verificar que a exposição das amostras de GFRP à temperatura de 60°C diminuiu a resistência mecânica dos varões, em comparação com as amostras de referência e com as expostas à temperatura de 20°C. Verifica-se, para o caso de 60°C, que a força vertical diminuiu de 1,9 kN para 1,5 kN (uma degradação de 21%), com a diminuição do deslocamento vertical de 14,1 mm para 11,3 mm (uma degradação de 20%). No caso dos varões em muretes, analisando os resultados para o caso dos varões de GFRP do murete MVR (varões não envelhecidos) não se verifica uma degradação para os varões no murete MVR1, no entanto, para o MVR2 observa-se um decréscimo, mas que poderá estar associado a problemas de fabrico, salientando que estes varões apresentavam fissuras no seu interior. No caso dos varões envelhecidos, colocados nos muretes MVE, verifica-se uma degradação da resistência à força vertical em 53 % e 74% para MVE1 e MVE2 respetivamente.

Tabela 3.6 - Resultados médios obtidos nos ensaios de flexão das amostras de varões de GFRP em água salgada, a 20°C e 60°C e ambiente alcalino a 60°C

Amostra	Ambientes de exposição	Tempo de exposição [h]	$F_{Vmax}$ [kN]	$\delta_V^{FVmax}$ [mm]	$\epsilon_f$ [%]
Varão de GFRP com $\varnothing 9,5$ mm	Referência	0	1,9	14,1	2,1
	Salino a 20°C	1500	1,8	13,7	2,0
		3600	1,7	13,2	1,9
		5000	1,7	12,9	1,9
	Salino a 60°C	1500	1,6	11,6	1,5
		3600	1,5	11,2	1,6
		5000	1,5	11,3	1,7
	Varões retirados de muretes de alvenaria de tijolo cerâmico	MVR1	1,9	15,2	2,2
		MVR2	1,5	13,6	2,0
		MVE1 (5184h)	0,9	10,0	1,5
		MVE2 (5184h)	0,5	7,0	1,1

MVR1 / MVR2 – Murete de alvenaria com dois varões de GFRP sem qualquer tipo de envelhecimento;  
MVE1 / MVE2 – Murete de alvenaria com dois varões de GFRP sujeitos a um ambiente alcalino a 60°C

### 3.4.3. Microscópio de varrimento eletrônico (SEM)

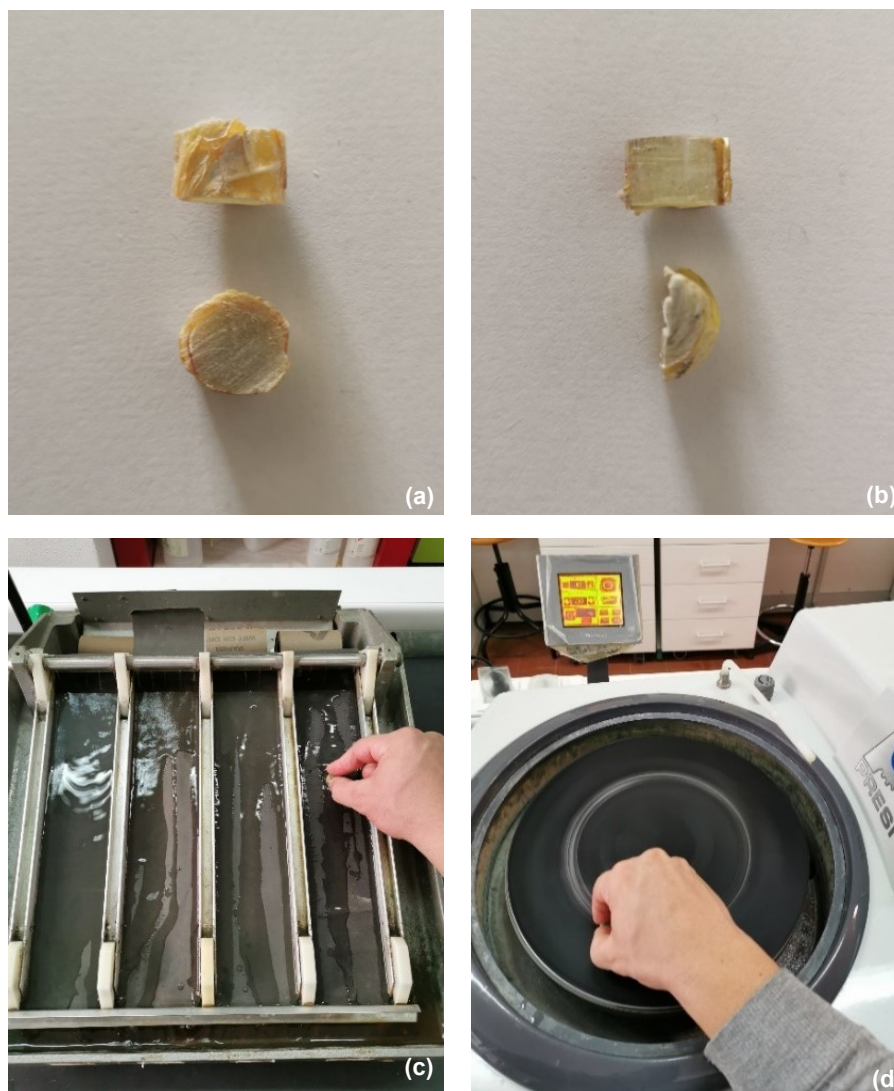
A técnica de microscopia eletrônica de varrimento SEM (do inglês, *Sanning Electron Microscope*) é realizada através de um feixe acelerado de elétrons que penetra na amostra e permite reproduzir a superfície em 3D com o nível do micrómetro. Esta técnica é utilizada para analisar a degradação nos materiais que é motivada pela sua capacidade de avaliar a estrutura das amostras, com a sua representação tridimensional.

No presente estudo, foram analisadas, em microscópio eletrônico, amostras na periferia e no centro de varões de fibra de vidro (nomeadamente, de varões antes de envelhecimento e depois de envelhecimento), tanto à temperatura ambiente como a 60°C, podendo assim comparar-se as degradações existentes em consequência de exposição a ambientes agressivos ao qual foram sujeitas.

Foram realizados cortes na direção transversal (Figura 3.12 (a)) e longitudinal (Figura 3.12 (b)) às fibras, de modo a analisar toda a estrutura das amostras de GFRP. A preparação dos varões consistiu em fazer cortes de 10 mm de espessura e polimento nos varões de GFRP, para que possam ser colocados no microscópio. Para o polimento das amostras, foram necessárias quatro lixas com granulação diferente, que pertencem ao equipamento Struers - Figura 3.12 (c). Da mais grossa para a mais fina, com mudança de lixa aos 30 movimentos, o polimento foi primeiramente efetuado na direção perpendicular à direção das fibras e, seguidamente, de forma paralela, mudando posteriormente de lixa. Para finalizar e aperfeiçoar as amostras, foi utilizado o equipamento Presi Minitech - Figura 3.12 (d) - uma lixa circular



mais fina do que as anteriores. Este processo consistiu em colocar na lixa circular a amostra com as mesmas faces que foram polidas anteriormente.



(a) corte transversal em amostras de GFRP; (b) corte longitudinal em amostras de GFRP; (c) polimento no equipamento Struers; (d) polimento no equipamento Presi Mlnitech

Figura 3.12 - Preparação das amostras de GFRP para análise em SEM

Depois de polidas, foi utilizado o microscópio eletrónico com lentes Leica - Figura 3.13 (a) - com o *zoom* necessário para avaliar as amostras (o *zoom* mínimo de 0.5 vezes). Esta avaliação foi necessária para definir o local onde as estruturas foram afetadas pelos ambientes de exposição e definir qual a área a analisar posteriormente no SEM. Depois de avaliadas as amostras, procedeu-se à preparação para a análise no SEM, sendo necessário colar as amostras a um material condutor - Figura 3.13 (b) - e introduzir no equipamento *Agar Sputter coater* - Figura 3.13 (c) - de modo a revestir as amostras a ouro - Figura 3.13 (d) – finalizando-se assim a preparação das amostras.



(a) avaliação de amostras no microscópio eletrónico; (b) preparação de amostras para revestimento a ouro; (c) equipamento Agar Sputter Coater; (d) amostras finais com revestimento de ouro para ensaio SEM

Figura 3.13 - Análise e preparação final de amostras de GFRP para ensaio em SEM

Com as amostras preparadas, estas foram introduzidas no SEM para análise da sua degradação provocada pelos ambientes de exposição. O equipamento utilizado encontra-se no CENIMAT da FCT NOVA: é um SEM Zeiss DSM 962, tratando-se de um SEM convencional (Figura 3.14). Este SEM vem equipado com três detetores que permitem a leitura de eletrões secundários, denominados de SE, de eletrões retrodifundidos (BSE) e de X-rays fotões. No ensaio realizado, foram utilizados os SE, que são eletrões de baixa energia com um detetor lateral. Foram realizadas análises na periferia e no centro da amostra, com um zoom de 45 e de 200  $\mu\text{m}$  para cada uma das áreas.

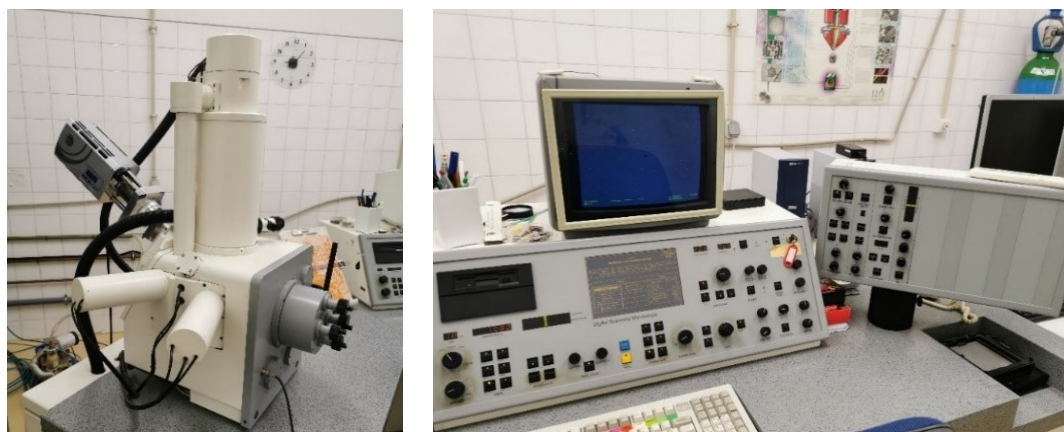
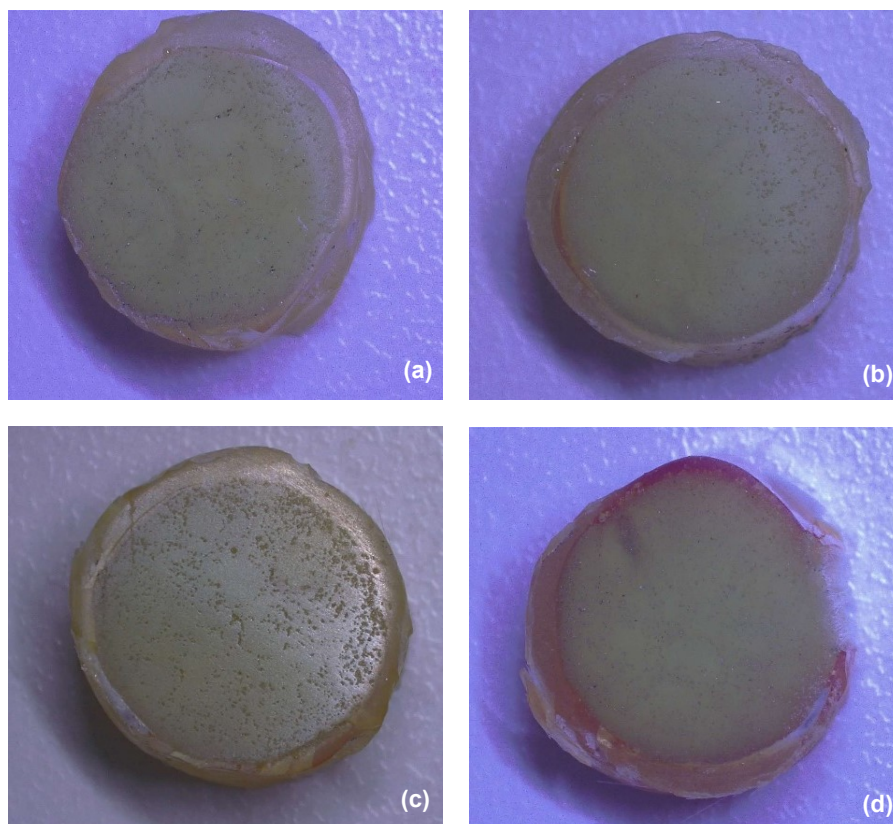


Figura 3.14 - SEM Zeiss DSM 962

Na Figura 3.15, é possível ver as imagens das amostras de GFRP que foram analisadas no microscópio ótico, antes da análise no SEM, de modo a obter com precisão a área a analisar posteriormente no SEM. Comparando, por exemplo, a Figura 3.15 (a), que corresponde a 1500 horas de exposição à temperatura ambiente, com a Figura 3.15 (d), que corresponde a 5000 horas de exposição a 60° C, é possível verificar que a temperatura tem influência na degradação, com a deterioração visível da amostra exposta a 60°C.



(a) amostra com 1500 horas de exposição no ambiente salino, à temperatura ambiente; (b) amostra com 5000 horas de exposição no ambiente salino, à temperatura ambiente; (c) amostra com 1500 horas de exposição no ambiente salino, à temperatura de 60°C; (d) amostra com 5000 horas de exposição no ambiente salino, à temperatura de 60°C:

Figura 3.15 - Amostras de varões de GFRP analisadas no microscópio ótico, corte transversal

Na Figura 3.16, é possível ver as amostras de GFRP com corte na direção longitudinal às fibras. Verifica-se uma mudança na coloração de amarelado (Figura 3.16(a)) para acastanhado (Figura 3.16(b)).



(a) amostra de referência; (b) amostra com 5000 horas de exposição no ambiente salino, a 60°C

Figura 3.16 - Amostras de varões de GFRP, corte na direção longitudinal às fibras



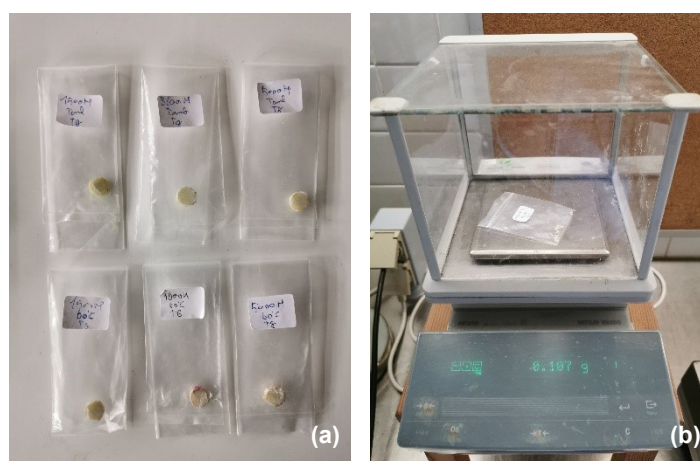
### 3.4.4. Temperatura de Transição vítrea (Tg)

Os materiais em estudo (varões de GFRP) sujeitos a variações de temperatura podem sofrer alterações das suas propriedades físico-químicas e mecânicas, especialmente com o aproximar da temperatura de transição vítrea, Tg, que geralmente varia entre os 50°C e os 260°C [4]. Devido ao facto de o presente estudo ser realizado com a imersão de varões de GFRP em soluções aquosas a temperaturas elevadas, foi feita uma avaliação do possível impacto da temperatura na Tg da resina do varão de GFRP, utilizando a técnica de análise térmica, mais especificamente: a calorimetria de varredura diferencial, também conhecida por DSC, do inglês, *Differential Scanning Calorimetry*.

A técnica DSC mede a energia calorífica necessária para ser atingido o equilíbrio térmico entre a amostra e um material inerte de referência, em função do tempo ou da temperatura. As amostras são sujeitas a condições semelhantes de aquecimento a taxa controlada, fazendo 2 aquecimentos sucessivos. Esta análise térmica fornece dados valiosos, não só das transformações sofridas, mas também da estabilidade térmica, da composição química ou da constituição estrutural do material. No entanto, tem limitações como calibrações incorretas, inadequação da referência, preparação deficiente das amostras (no caso de matérias heterogéneas como os GFRP, é difícil ter amostras homogêneas entre si).

Esta é uma técnica simples, rápida e muito versátil, mas também muito sensível, de modo que os resultados irão depender do estado de cura da amostra (no caso estudado, a resina epóxi poderia estar num estado avançado e não fornecer dados no primeiro aquecimento, sendo os resultados credíveis apenas no segundo aquecimento).

Para a realização do ensaio de temperatura de transição vítrea, foi necessário preparar as amostras, através de processos de corte, moagem e pesagem, para cada amostra ter cerca de 50 mg - Figura 3.17 (a). Esta pesagem foi realizada na balança disponível no laboratório de construção da FCT NOVA (modelo PR1203 Mettler Toledo, com precisão de 0.001 g, adequada à pesagem das amostras) - Figura 3.17 (b).

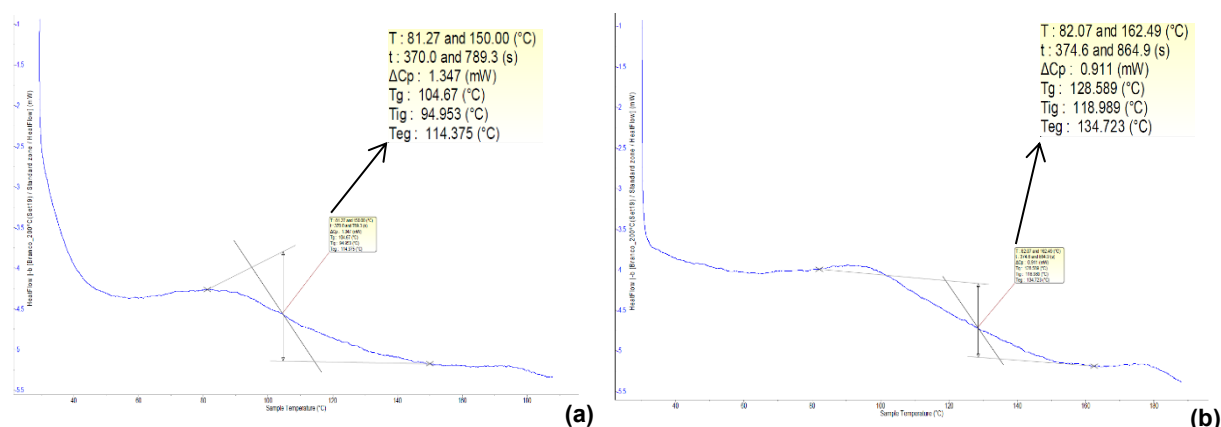


(a) preparação das amostras; (b) pesagem das amostras

Figura 3.17 - Preparação de amostras para a determinação da temperatura de transição vítrea (Tg)

A determinação da temperatura de transição vítrea foi realizada na FCT NOVA, no Laboratório Associado para a Química Verde, LAQV (denominado Requimte), através do ensaio de calorimetria de varredura diferencial (DSC), segundo a norma ISO 11357-1 [41]. Os ensaios foram realizados através de uma rampa da temperatura ambiente até 200°C, a 10°C/min, sob atmosfera de azoto (50 ml/min), em cadinho de alumínio, em que foram realizados dois aquecimentos sucessivos nestas condições.

A Figura 3.18 mostra o diagrama da transferência de calor em função da temperatura de amostras de varões de GFRP, obtido pelo DSC para da amostra de GFRP de referência, sendo este um diagrama tipo dos resultados obtidos para todas as amostras (os restantes encontram-se no anexo E).



(a) amostra de varões GFRP de referência, 1º ensaio, 2º aquecimento; (b) amostra de varão GFRP de referência, 2º ensaio, 2º aquecimento;

Figura 3.18 - Resultados da Tg das amostras de GFRP de referência

Na Tabela 3.7, são apresentados os resultados médios obtidos da Tg para as amostras de GFRP, sendo possível verificar que as amostras expostas a 60°C registaram uma diminuição da sua Tg mais acentuada do que as amostras expostas à temperatura ambiente. Observa-se que para as amostras sujeitas ao ambiente de 20°C a Tg demonstra uma degradação de cerca de 7,5% quando comparada com a amostra de referência, para as amostras sujeitas ao ambiente de 60°C o nível degradação aumenta para os 9,7%. No entanto, verifica-se que existe uma recuperação da propriedade em análise para ambas as amostras, a 20°C e 60°C, das 3600 horas para as 5000 horas.

Tabela 3.7 - Resultados médios da Tg das amostras de GFRP

Amostra	Ambientes de exposição	Quantidade [mg]	Tempo de exposição [h]	Tg [°C]
Varão de GFRP com Ø9,5 mm	Referência	50	0	116,6
	Salino a 20°C	50	1500	111,3
			3600	107,8
			5000	108,0
	Salino a 60°C	50	1500	108,7
			3600	105,2
			5000	109,0



## Capítulo 4

### Comportamento de varões de GFRP em muretes de alvenaria

#### 4.1. Introdução

Neste capítulo descreve-se o sistema de ensaio realizado em muretes de alvenaria de tijolo cerâmico com a colocação de varões de GFRP na sua juntas horizontais. Tem como objetivo o estudo do comportamento e influência dos varões de GRFP na resistência dos muretes, quando sujeitos a uma carga monotónica perpendicular ao seu plano. São descritos os tipos de muretes e varões utilizados, os métodos e equipamentos utilizados para o ensaio e relata-se o comportamento mecânico para cada murete.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas Pesadas de Engenharia Civil da FCT NOVA. Este estudo apenas considera muretes simplesmente apoiados, sem atrito inferior e superior, existindo apenas apoio nas arestas verticais com perfis metálicos e argamassa, simulando um encastramento parcial.

#### 4.2. Caracterização de materiais utilizados na construção dos muretes

Nesta secção são descritos os materiais utilizados para a construção dos muretes utilizados na presente dissertação. São apresentados os materiais e respetivos ensaios de caracterização mecânica realizados aos seguintes materiais: tijolo cerâmico e argamassa REABILITA Cal Consolidação.

##### 4.2.1. Tijolo cerâmico

O tijolo cerâmico utilizada (Figura 4.1) foi cedido pela empresa Cerâmica Torreense, Lda. A determinação das propriedades foi realizada por vários autores no DEC FCT NOVA, tendo sido utilizados os resultados obtidos por Silva [42].



Figura 4.1 - Tijolo cerâmico

Como o tijolo não possui dimensões constantes, Silva [42] determinou estas medidas seguindo a norma EN 772-16 [43]. Na Tabela 4.1, apresentam-se os resultados obtidos por Silva [42].

Tabela 4.1 - Dimensões médias dos tijolos cerâmicos [42]

Material	Dimensões [mm]		
	Altura	Largura	Comprimento
Tijolo cerâmico	69,1	105	224,7

O peso volúmico foi determinado por Silva [42] com recurso às normas EN 772-13 [44] e EN 772-3 [45], tendo obtido o valor médio de 21,7 kN/m<sup>3</sup>.

Silva [42] determinou a resistência à compressão seguindo a norma EN 772-1 [46]. Na Tabela 4.2, representam-se os resultados obtidos por Silva [42].

Tabela 4.2 - Resultados do ensaio de compressão e do módulo de elasticidade [42]

Material	$\varepsilon_c$ [%]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_c$ [MPa]
Tijolo cerâmico	6,9	50,2	1187

#### 4.2.2. Argamassa

A argamassa utilizada foi a REABILITA Cal Consolidação (Figura 4.2), cedida pela empresa Secil Argamassas. A argamassa tem como ligante a cal hidráulica natural. Silva [42] realizou os testes de flexão e de compressão, tendo obtido o módulo de elasticidade, como se apresenta na secção seguinte.



Figura 4.2 - Argamassa REABILITA Cal Consolidação

No ensaio de flexão à argamassa, Silva [42] testou provetes segundo a norma EN 1015-11 [47], utilizou três provetes de 160 x 40 x 40 [mm], tendo como resultado a força máxima, e a resistência à flexão de cada provete, fazendo a média para obter o valor aproximado de cálculo da argamassa (ver Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de flexão [42]

Material	$F_{Vmax}$ [N]	$\sigma_f$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Argamassa REABILITA cal consolidação	618,7	1,5



Com as metades dos provetes resultantes do ensaio de flexão e segundo a norma EN 1015-11 [47], Silva [42] determinou a resistência à compressão, a extensão e o módulo de elasticidade - ver Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de compressão [42]

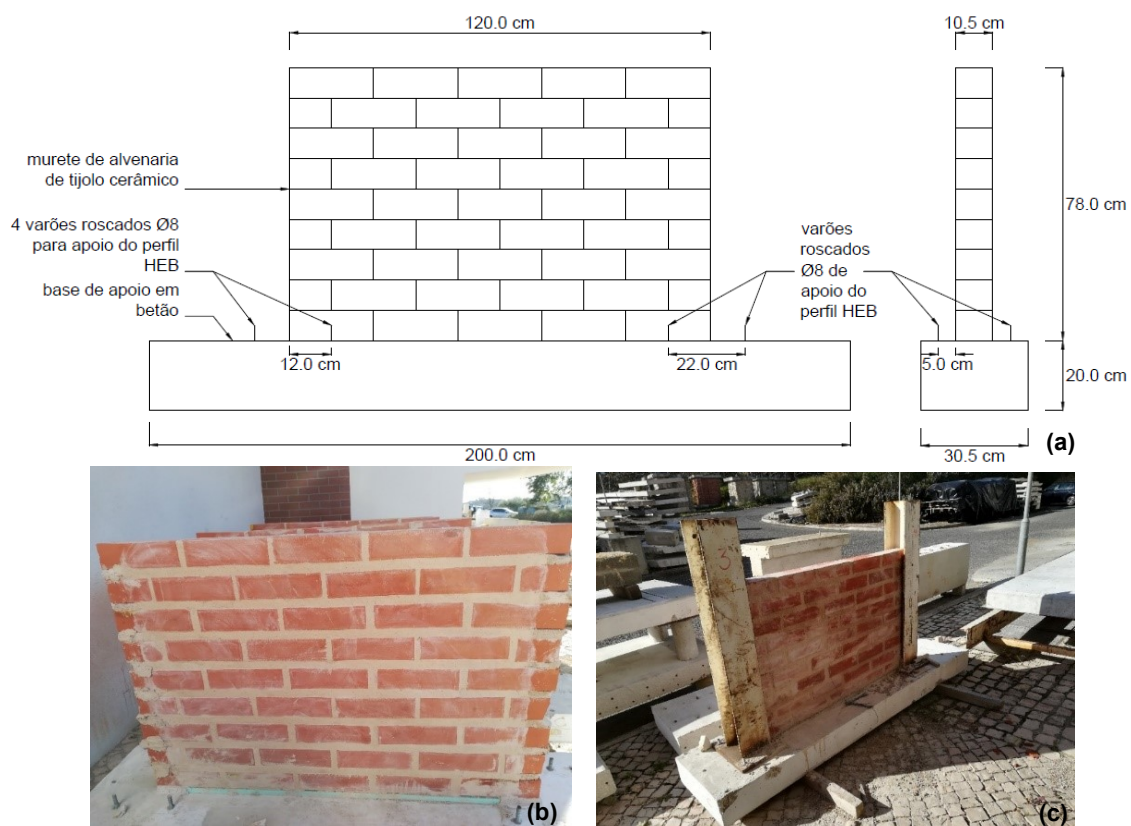
Material	$F_{Vmax}$ [N]	$\sigma_c$ [MPa]	$\varepsilon_c$ [%]	$E_c$ [MPa]
Argamassa REABILITA cal consolidação	1221,2	7,6	2,9	470

### 4.3. Muretes de alvenaria de tijolo cerâmico

No presente capítulo descreve-se a construção dos muretes e a sua definição consoante o estado de degradação do varões de GFRP utilizados nas juntas horizontais de cada murete.

#### 4.3.1. Descrição dos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico

Para o ensaio, foram construídos 6 muretes com alvenaria de tijolo cerâmico e argamassa de cal (Reabilita cal consolidação), com as medidas de 120,0 x 78,0 x 10,5 [cm] como se pode verificar na Figura 4.3 (a) uma representação esquemática, e na Figura 4.3 (b), o murete construído. Estes foram construídos sobre uma base de betão e confinados com perfis metálicos HEB160 (Figura 4.3 (c)), para posteriormente ser possível nivelar e segurar em segurança o murete, durante o ensaio de carga perpendicular ao plano do murete. Estes muretes foram construídos junto ao DEC da FCT NOVA.



(a) esquema de construção do murete de alvenaria; (b) murete de alvenaria; (c) murete preparado para ensaio de carga monotónica

Figura 4.3 - Representação do murete de alvenaria de tijolo cerâmico

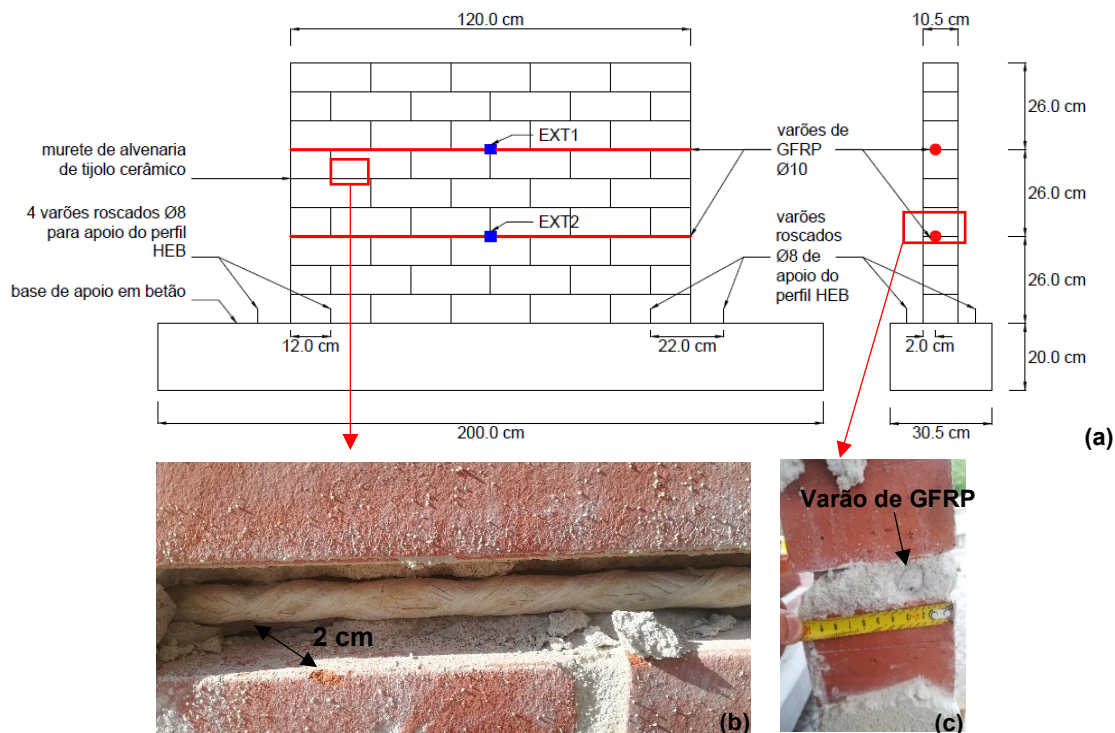
#### 4.3.2. Definição dos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico

Os muretes foram construídos em pares de 2, num total de 6, com e sem varões de GFRP colocados nas suas juntas horizontais, com a seguinte nomenclatura:

- 2 Muretes de referência sem varões de GFRP – MSV
- 2 Muretes com 2 varões de GFRP – MVR
- 2 Muretes com 2 varões de GFRP sujeito a ambiente agressivo – MVE

A série MSV composta por dois muretes de referência, MSV1 e MSV2, utilizados como termo de referência para comparação. A série MVR, MVR1 e MVR2, foram construídos aplicando varões de GFRP no seu estado original, colocados nas juntas horizontais, como se pode observar na Figura 4.4. A mesma solução foi utilizada para os dois últimos muretes, denominados de série MVE, MVE1 e MVE2, no quais foram colocados varões de GFRP expostos ao ambiente de exposição de uma solução alcalina de 2,4g/l NaOH + 19,6 g/l KOH + 2 g/l Ca(OH)<sub>2</sub>, em 5l de água destilada, a 60°C durante 5184 horas. Podendo assim avaliar-se a influência produzida pela degradação na resistência total do conjunto.

Os varões de GFRP foram colocados nas juntas horizontais dos muretes, na face oposta à aplicação da carga, sendo que, em cada um, foi colocado um extensómetro (EXT1 e EXT2 na Figura 4.4 (a)), para medição da deformação durante toda a experiência. Na Figura 4.4 (a), apresenta-se o esquema de localização dos varões de GFRP, com a sua colocação a 2 centímetros da superfície, como se pode verificar na Figura 4.4 (b) e (c).



(a) esquema de localização dos varões de GFRP nos muretes, medidas em cm; (b) localização dos varões de GFRP - vista frontal do murete; (c) localização dos varões de GFRP - vista lateral do murete

Figura 4.4 - Localização dos varões de GFRP colocados nos muretes de alvenaria de tijolo

Na Tabela 4.5, apresentam-se, as características geométricas dos muretes de alvenaria de tijolo.

Tabela 4.5 - Características geométricas dos muretes de alvenaria de tijolo

Série	Comprimento [cm]	Altura [cm]	Espessura [cm]	Rácio h/t	Nº varões de GFRP	$\rho_v$ [%]
MSV	120,0	78,0	10,5	7,4	0	0
MVR	120,0	78,0	10,5	7,4	2	9,6
MVE	120,0	78,0	10,5	7,4	2 (ambiente alcalino)	9,6

h – altura do murete; t – espessura do murete;  $\rho_v$  – percentagem de varões no murete

#### 4.4. Descrição do ensaio dos muretes de alvenaria de tijolo

##### 4.4.1. Setup de ensaio

Para realizar o ensaio em condições de segurança, foi necessário dimensionar um sistema de travamento para os muretes. Para esse efeito, foram colocados perfis metálicos (UPN200) com varões *Dywidag*  $\varnothing 36$  mm apertados ao pavimento do laboratório - Figura 4.5 (a) e (b) - foi colocado um varão *Dywidag*  $\varnothing 36$  mm horizontal apertado ao centro da viga metálica e à parede de reação- Figura 4.5 (c) e (d) - de modo a evitar o derrubamento do murete durante a aplicação da carga.

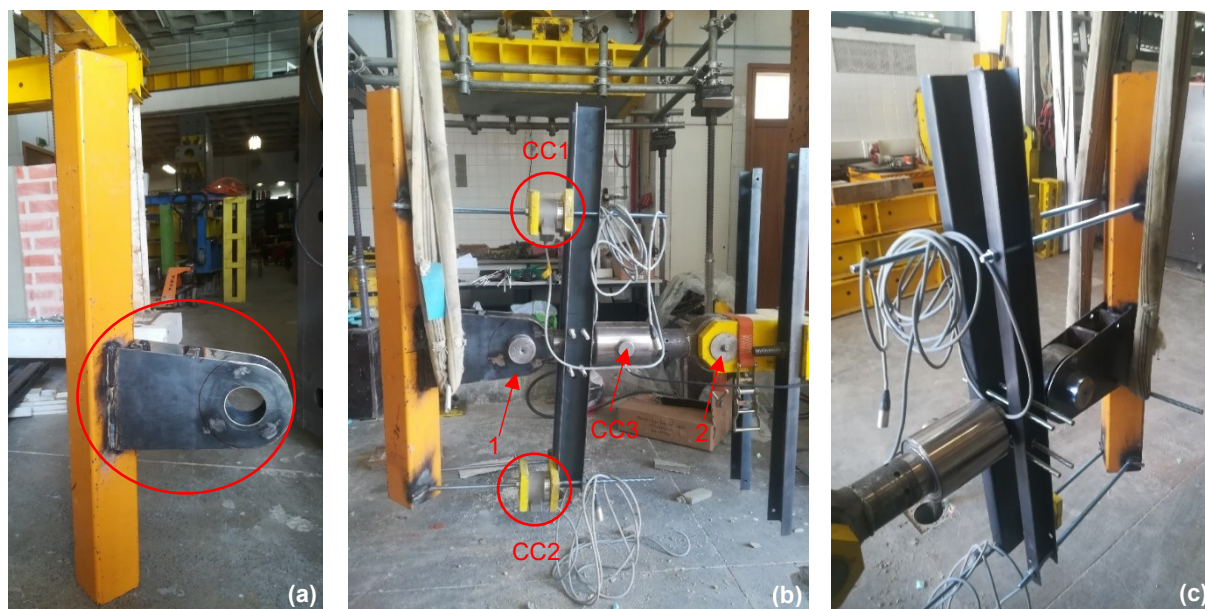


(a) sistema de travamento do murete - face de carga; (b) sistema de travamento - face oposta à da aplicação da carga; (c) fixação do *Dywidag*  $\varnothing 265$ ; (d) varão *Dywidag*  $\varnothing 265$

Figura 4.5 - Sistema de fixação do murete de alvenaria de tijolo cerâmico



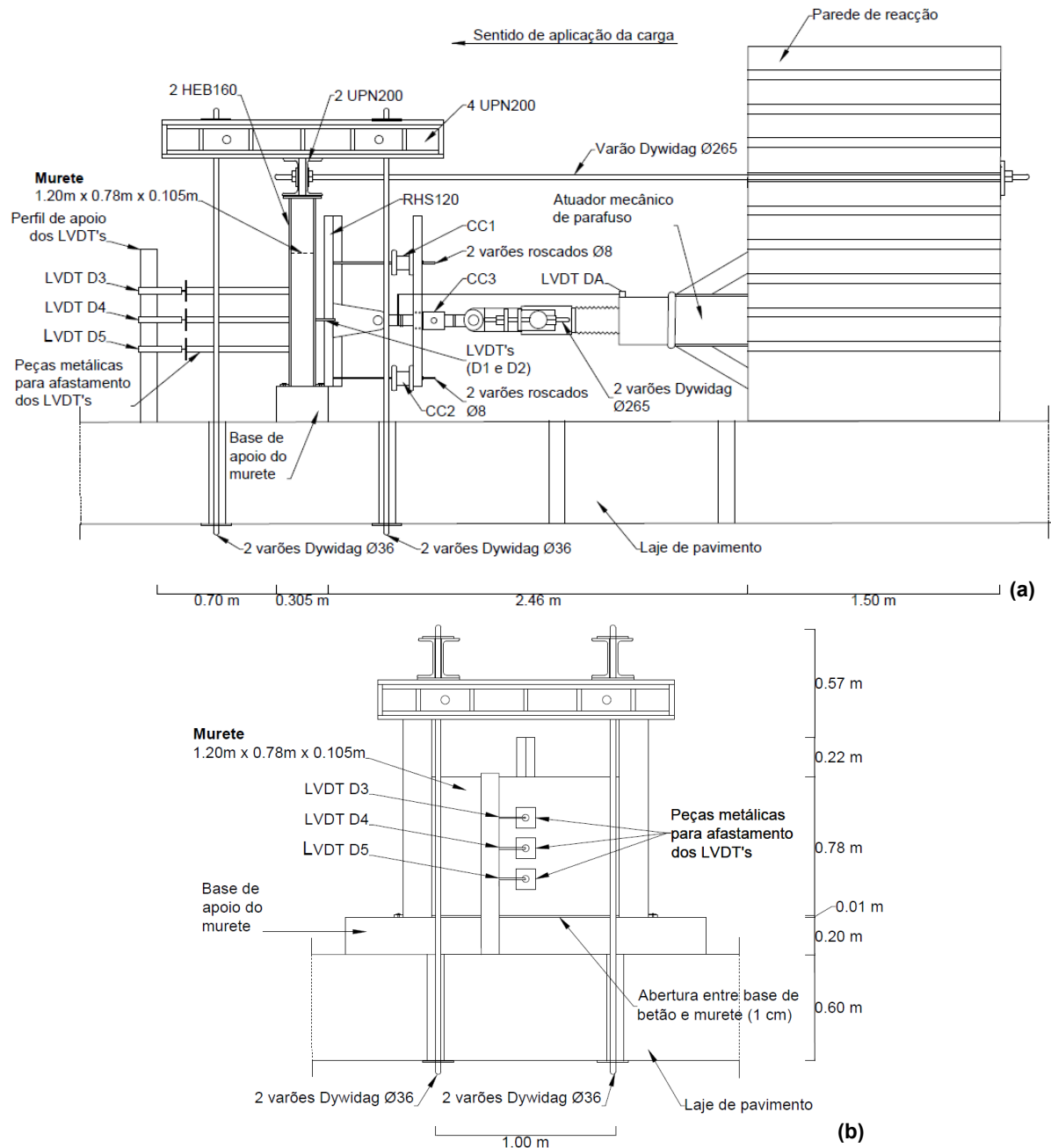
Por último, foi necessário dimensionar um “dispositivo” para aplicar a força horizontal uniformemente distribuída no murete. A solução foi dimensionada com uma atenção especial às ligações da célula de carga (CC3): dado serem rotulares - Figura 4.6 - fator que poderia comprometer a realização do ensaio no sentido de causar uma rotação do “dispositivo” durante o ensaio. Assim, para o “dispositivo,” foram dimensionadas duas chapas metálicas, tendo-se então soldado num perfil metálico RHS120, como se pode observar na Figura 4.6 (a). No entanto, o sistema encontrava-se ainda constituído por duas rótulas como se pode observar na Figura 4.6 (b) (1 e 2), o que poderia comprometer o ensaio. Assim, para anular a ação de uma das rótulas, foi dimensionada uma estrutura com varões de aço roscados  $\varnothing 8$  mm e cantoneiras de abas iguais, como se pode observar na Figura 4.6 (b) e (c). Com este modelo, foi possível ajustar a verticalidade do “dispositivo” sempre que necessário e anular a ação da rótula frontal, denominada de 1 na Figura 4.6 (b), (ou seja, da rótula junto à chapa metálica dimensionada), mantendo-se a rótula do atuador, necessária para anular transmissão de esforços da célula de carga para o atuador. Para segurança, e devido ao sistema dimensionado ser apertado à célula de carga (CC3) e esta possuir uma baixa resistência ao corte, foi necessário utilizar duas células de carga menores, assinaladas com círculo vermelho (CC1 e CC2) na Figura 4.6 (b) e fixas nos varões roscados (uma no varão de cima e outra no de baixo), para verificar o resultado das forças atuantes transmitidas à célula de aplicação de carga principal (CC3). Deste modo foi possível monitorizar (ao longo do ensaio) todas as forças envolvidas e realizar a experiência em segurança, sem danificar os equipamentos utilizados.



(a) peças metálicas para aplicação de carga; (b) células de controlo de forças de corte; (c) dispositivo de aplicação de carga perpendicular ao plano dos muretes

Figura 4.6 - Dispositivo de aplicação da carga perpendicular ao plano dos muretes

Na Figura 4.7, é possível ver um esquema geral de aplicação de carga para cada ensaio dos muretes. Representa-se o ensaio de carga perpendicular ao plano dos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico, o alçado lateral, Figura 4.7 (a), e o alçado na face oposta à aplicação da carga, Figura 4.7 (b).



(a) alçado lateral; (b) alçado face oposta à aplicação da carga

Figura 4.7 - Esquema do sistema de ensaio em muretes de alvenaria de tijolo cerâmico

#### 4.4.2. Equipamentos

Para o ensaio, foi necessário utilizar vários equipamentos:

- Atuador
- Células de carga
- Defletómetros (LVDT's)
- Extensómetros
- Estação de registo de dados (computador, spyder8 e controlador de atuador)

Na Figura 4.8, é possível ver um esquema geral do posicionamento dos equipamentos.

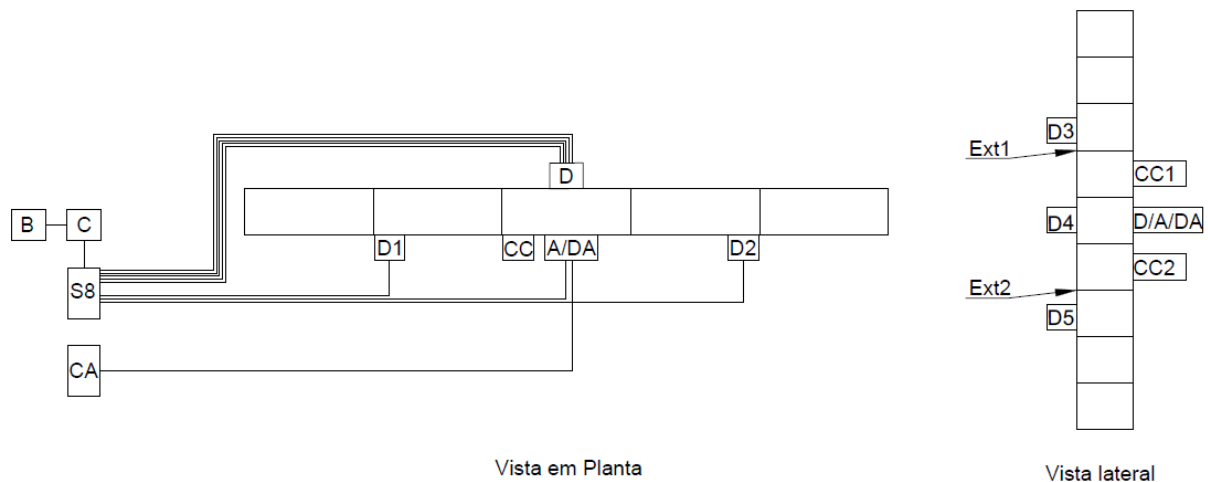


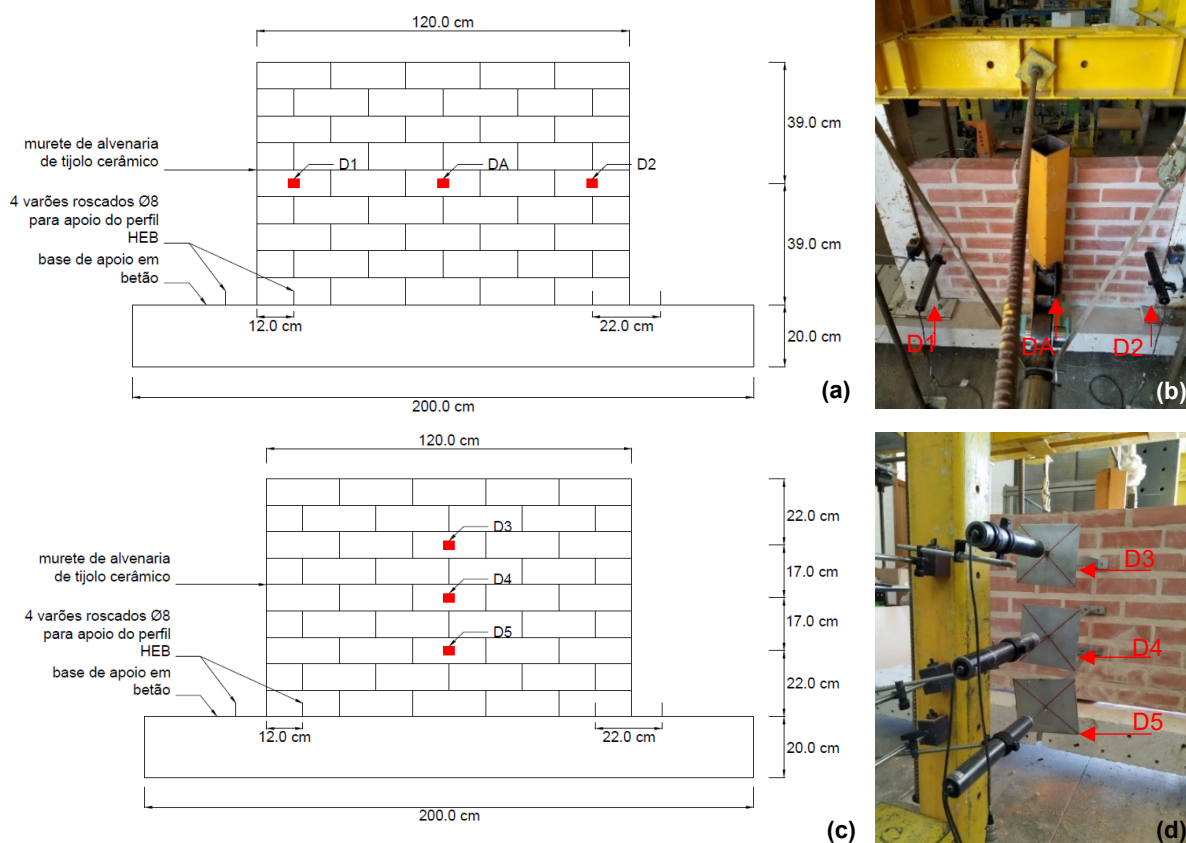
Figura 4.8 - Esquema de localização de equipamentos

Na Figura 4.8, é possível ver um esquema geral dos equipamentos utilizados, sendo que; **(A)** é o atuador que aplica a carga no murete, acoplado a este tem uma célula de carga, CC3, Modelo FIMEI CS – 24 com capacidade de  $\pm 500\text{kN}$ ; **(B)** é um *Back up* que assegura, caso falhe a energia, para que o ensaio e os dados não sejam perdidos; **(C)** é o sistema de aquisição de dados composto por um computador que analisa os dados no programa “catman4.0”, da marca HBM; **(CA)** é o controlador do atuador; **(CC)** são duas células de cargas TML TCLP-20B, CC1 e CC2, (Figura 4.7 (b)), com capacidade de  $\pm 200\text{kN}$ ; **(D)** são cinco defletômetros (LVDT's) utilizados para medição dos deslocamentos horizontais (Figura 4.9 (a)), modelo CDP-1009, Tokycki Kenkyujo Co., Ltd, com curso de 100mm: dois na parte posterior (lado da atuação da carga) e os restantes na parte anterior à aplicação da carga, no eixo vertical; **(DA)** é o defletômetro de fio para medição do avanço e recuo do atuador, com curso de 500 mm; **(EXT)** são os extensômetros elétricos de resistência, da marca TML, modelo FLA-5-11, utilizados nos varões de GFRP e **(S8)** é composto pelo spyder8 com capacidade de 8 canais, marca HBM, (Figura 4.9 (a)), que recebe, converte e transmite os dados registados pelos defletômetros, extensômetros e células de carga para o computador.



Figura 4.9 - Equipamentos utilizados no ensaio em muretes de alvenaria de tijolo

Os defletômetros utilizados (**D**) (um total de cinco: dois na parte posterior (lado da atuação da carga e os restantes na parte anterior à aplicação da carga) permitem melhorar a aproximação do deslocamento horizontal do murete. Na Figura 4.10 (a) e (c), apresenta-se um esquema da localização dos defletômetros nos muretes. Na face da aplicação da carga, foram colocados dois defletômetros junto a cada apoio, como se pode observar na Figura 4.10 (b). Os três defletômetros colocados na face oposta à aplicação da carga foram colocados no eixo vertical do murete, como se pode observar na Figura 4.10 (d). Para a sua aplicação, foi necessário dimensionar peças metálicas, de modo a afastar o defletómetro da estrutura, de forma que, na eventualidade de colapso do murete, não se danificasse o equipamento - as referidas peças estão assinaladas a vermelho na Figura 4.10 (d).



(a) esquema de localização dos defletômetros - face de aplicação de carga (c) localização de defletômetros - face de aplicação de carga; (c) esquema de localização dos defletômetros - face oposta à aplicação de carga; (d) localização de defletômetros - face oposta à aplicação de carga.

Figura 4.10 - Localização dos defletômetros nos muretes

Para o ensaio, foi necessário utilizar alguns materiais e equipamentos existentes no laboratório, tais como o atuador (**A**), como se pode ver na Figura 4.11 (a). O atuador, para a aplicação da carga, dispõe de um sistema de célula de carga (CC3) - Figura 4.11 (a) - com uma capacidade de 500 kN, o que se revelou suficiente, já que apenas se chegou aos  $\pm 22$  kN no murete com maior resistência. Associado ao atuador, existe ainda um defletómetro de fio (**DA**) - Figura 4.11 (b) – que regista o deslocamento horizontal associado ao movimento do atuador, avanço ou recuo, sendo também possível comparar,



neste caso, com o defletómetro D4, devido ao posicionamento ser o mesmo (centro do murete), conseguindo-se assim uma melhor aproximação do deslocamento central do murete.

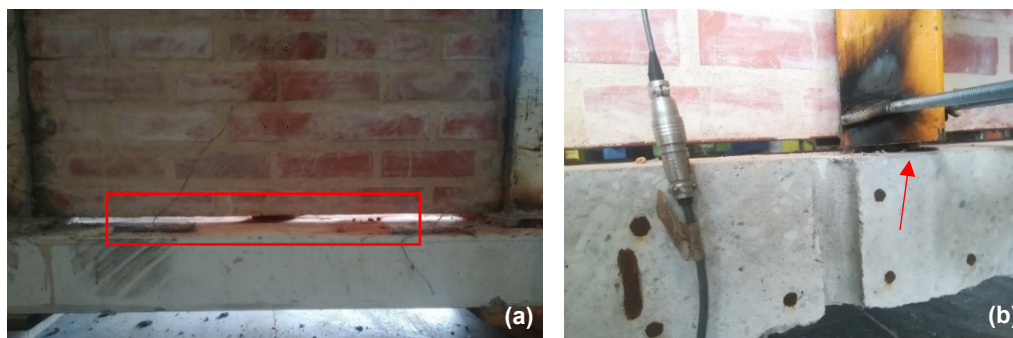


(a) atuador; (b) defletómetro de fio

Figura 4.11 - Sistema de aplicação de carga nos muretes

#### 4.4.3. Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado com uma carga monotónica, que consiste em aplicar um deslocamento horizontal num só sentido, até à rotura dos muretes. Foi aplicada com uma velocidade constante no atuador (de 2000 rotações por minuto) e medições de dados a cada 0,5 segundos. De salientar que foi necessário ter em conta alguns detalhes para o ensaio funcionar corretamente, tais como a eliminação total do atrito, tanto na base do murete - Figura 4.12 (a) - como na base do dispositivo de aplicação de carga - Figura 4.12 (b).



(a) murete sem atrito na sua base; (b) aplicação de carga sem atrito na sua base

Figura 4.12 - Pormenores de aplicação de carga nos muretes

#### 4.5. Resultados dos ensaios nos muretes de alvenaria de tijolo

Os resultados obtidos nos ensaios aos muretes de alvenaria de tijolo são apresentados na secção seguinte, nomeadamente: diagrama de força horizontal-deslocamento, diagramas de tensão-deformação nos varões de GFRP, exceto nos muretes MSV (no qual não foram colocados), e análise do registo fotográfico. De salientar que todos os diagramas apresentados são prolongados até uma perda de 15% da força horizontal máxima, ou seja, até 75% da força máxima em cada murete.



#### 4.5.1. Série MSV

O murete MSV1, sem varões de GFRP, foi o primeiro murete de referência sujeito à carga perpendicular ao plano. Na Figura 4.13, verifica-se que o murete MSV registou uma resistência média à força horizontal de 10,1 kN, com um deslocamento horizontal correspondente de 38,5 mm. O murete deformou de forma simétrica, registrando fissuras no seu no eixo vertical - Figura 4.14 (a) e (b). Verificou-se também nos apoios, como se pode ver na Figura 4.14 (c) e (d), corte do tijolo cerâmico.

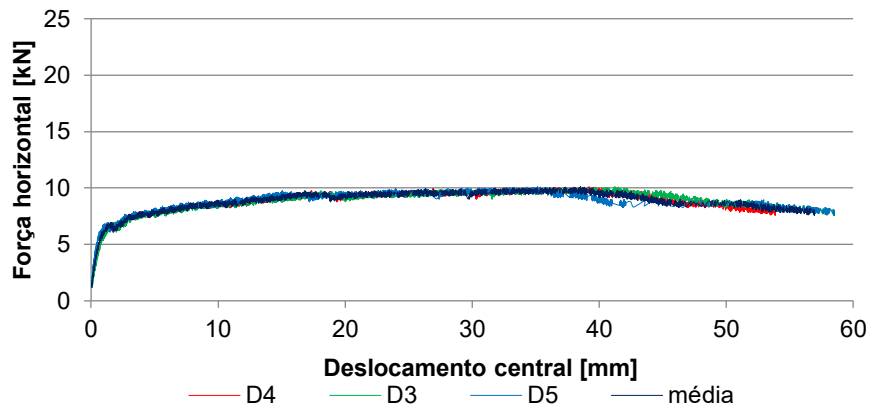
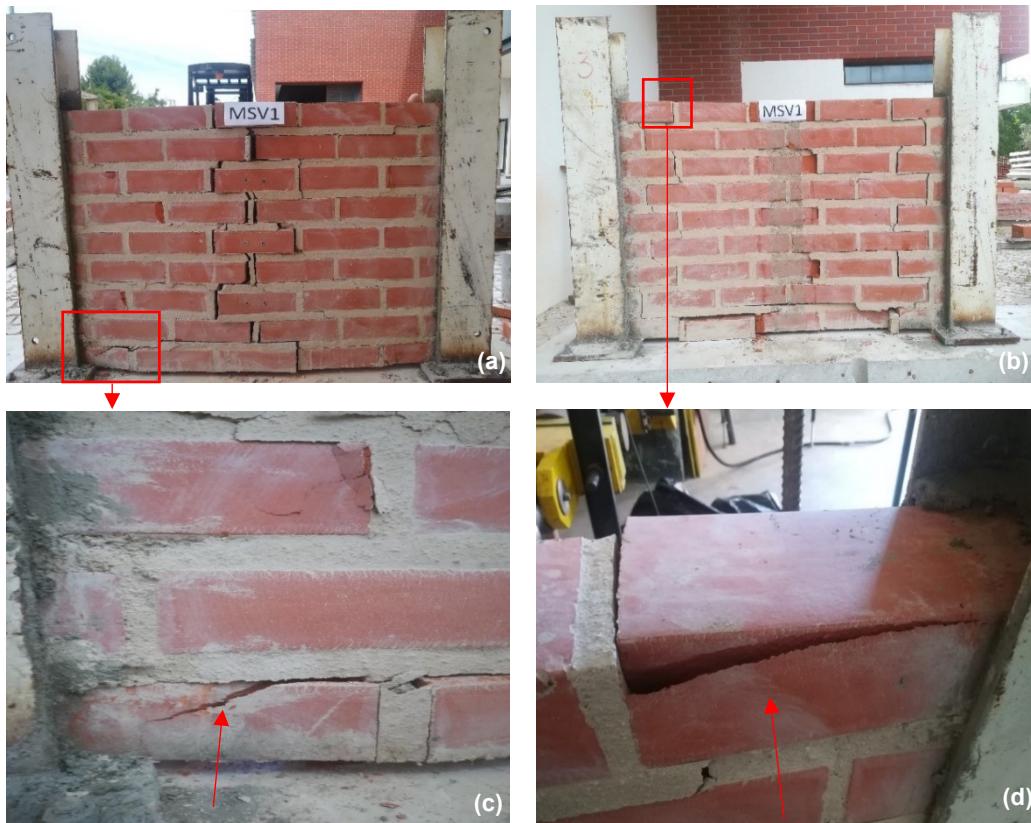


Figura 4.13 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MSV1



(a) face oposta à da aplicação da carga perpendicular ao plano; (b) face de aplicação da carga perpendicular ao plano; (c) corte do tijolo cerâmico no canto inferior esquerdo do murete; (d) corte do tijolo cerâmico no canto superior esquerdo.

Figura 4.14 - Murete MSV1 após ensaio de carga perpendicular ao plano

O murete MSV2, sem varões de GFRP, foi o segundo murete de referência sujeito à carga perpendicular ao plano. Na Figura 4.15, pode verificar-se que o murete MSV1 registou um comportamento ao longo do eixo vertical, obtendo uma resistência média à força horizontal de 12,8 kN, com um deslocamento horizontal correspondente de 23,0 mm. De forma análoga ao murete MSV1, o murete MSV2 deformou de forma simétrica, registando fissuras no seu no eixo vertical - Figura 4.16 (a) e (b). Verificou-se também no apoio e a meia altura um corte (Figura 4.16 (c)) e (Figura 4.16 (d)) do tijolo cerâmico.

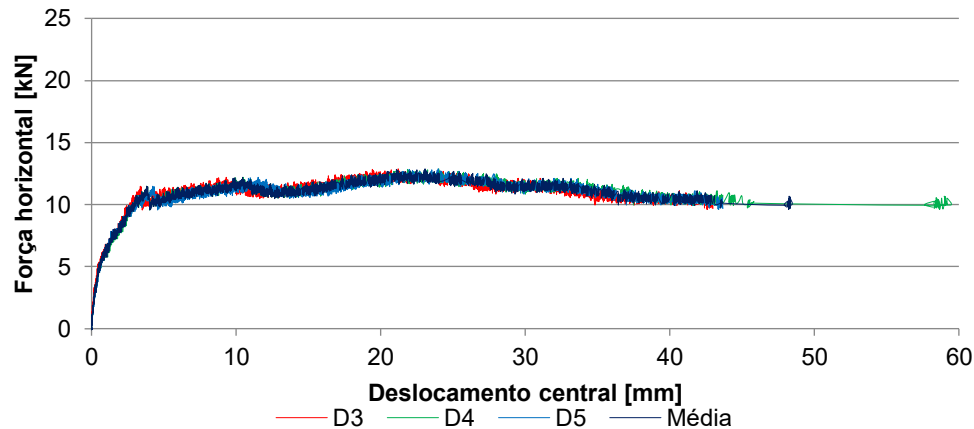


Figura 4.15 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MSV2



(a) face oposta à da aplicação da carga perpendicular ao plano; (b) face de aplicação da carga perpendicular ao plano; (c) corte do tijolo cerâmico do lado direito do murete; (d) corte do tijolo cerâmico no canto inferior direito.

Figura 4.16 - Murete MSV2 após ensaio de carga perpendicular ao plano

#### 4.5.2. Série MVR

O murete MVR1, com dois varões de GFRP de 9,5 mm no seu estado original, foi o primeiro murete a ser sujeito à carga perpendicular ao plano do murete. Este murete de alvenaria de tijolo resistiu a uma força horizontal máxima de 17,9 kN, com um deslocamento correspondente de 9,7 mm, como se pode verificar na Figura 4.17.

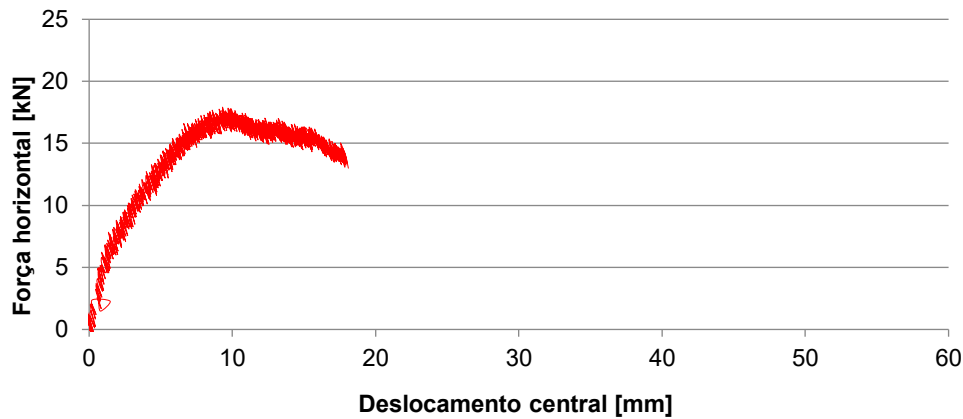


Figura 4.17 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MVR1

Na Figura 4.18, observa-se o diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP do murete MVR1. A tensão foi calculada para a força horizontal aplicada no murete e a deformação com recurso ao extensómetro colocado nos varões de GFRP. Pode observar-se que o varão inferior (EXT2) registou uma deformação menor, quando comparado com o varão superior (EXT1). Isto verificou-se devido ao facto de ter existido uma rotação do dispositivo de aplicação da carga, como se pode observar na Figura 4.19 (c), o que originou que a tensão fosse aplicada apenas no varão superior (EXT1). Com esta rotação, o murete apenas fendilhou do seu eixo horizontal para o topo, como é possível observar na Figura 4.19 (a) e (b). Os varões de GFRP colocados neste murete - Figura 4.19 (d) - não sofreram qualquer tipo de degradação, sendo que foram retirados dos muretes sem qualquer tipo de fissuras ou sinal de desgaste devido ao ensaio, concluindo-se que não atingiram a sua deformação máxima.

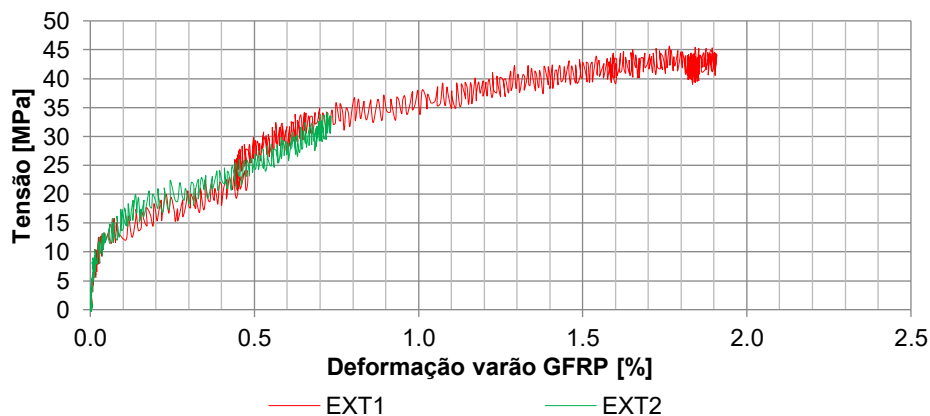


Figura 4.18 - Diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP do murete MVR1





(a) face oposta à da aplicação da carga perpendicular ao plano; (b) face de aplicação da carga perpendicular ao plano; (c) rotação do dispositivo de aplicação da carga perpendicular ao plano; (d) varões de GFRP do murete MVR1

Figura 4.19 - Murete MVR1 após ensaio de carga perpendicular ao plano

O murete MVR2, com dois varões de GFRP de 9,5 mm no seu estado original, foi o segundo murete da série MVR a ser sujeito à carga perpendicular ao plano. Este murete de alvenaria de tijolo resistiu a uma força horizontal média de 21,0 kN, com um deslocamento correspondente de 19,3 mm, como se pode verificar na Figura 4.20.

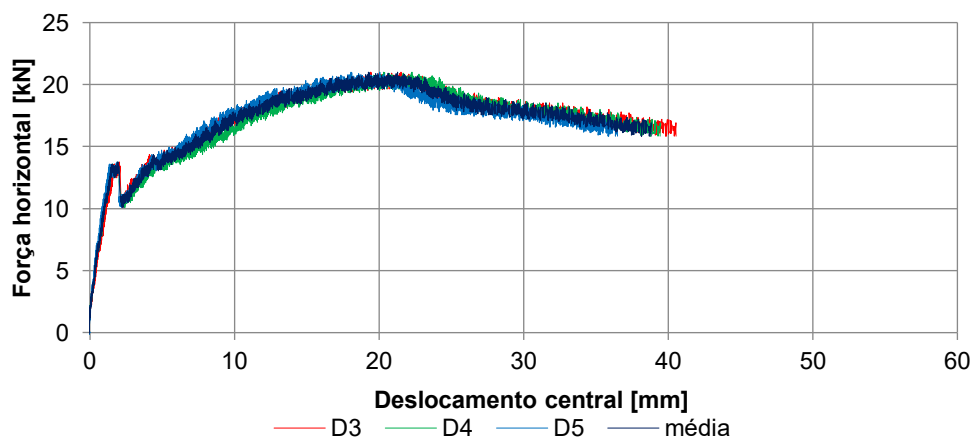


Figura 4.20 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MVR2

Na Figura 4.21, observa-se a deformação do varão de GFRP inserido na junta inferior do murete MVR2 (EXT2). A tensão foi calculada para a força horizontal aplicada no murete e a deformação com recurso ao extensómetro colocado nos varões de GFRP. Observa-se apenas deformação neste varão de GFRP devido ao facto de o extensómetro do varão superior ter interrompido o sinal no início no ensaio.

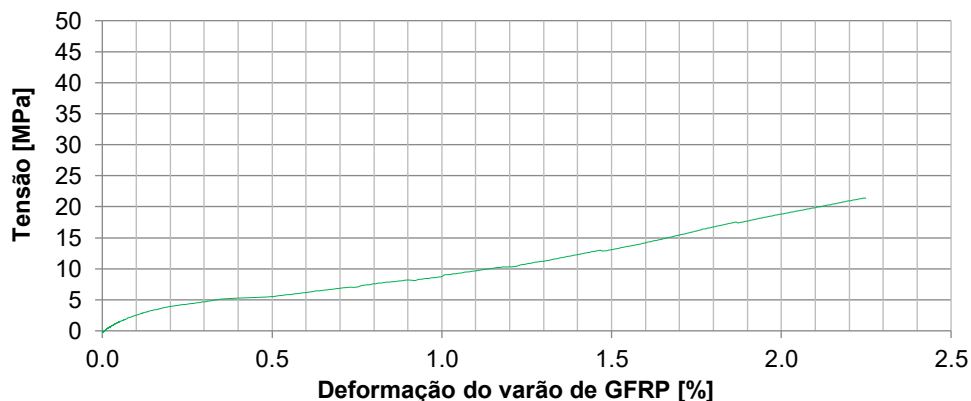
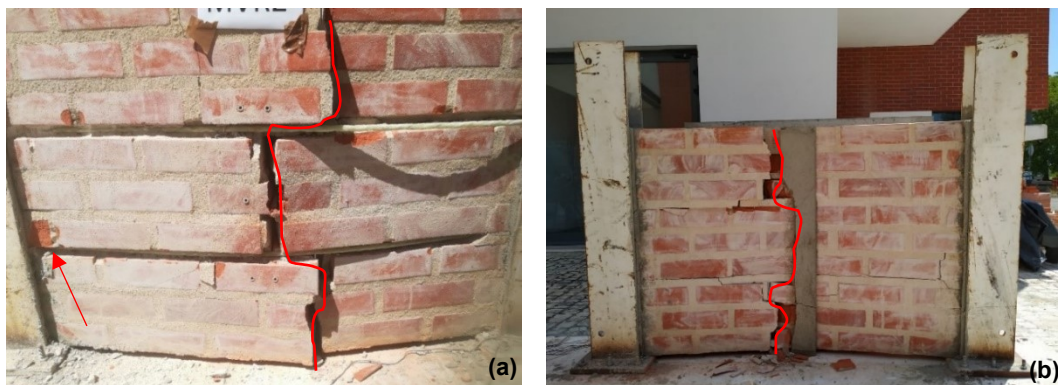


Figura 4.21 - Diagrama tensão-deformação do varão colocado na junta horizontal inferior de GFRP do murete MVR2

Neste ensaio, a rotura, diferente da observada nos outros muretes, foi controlada pelo corte do tijolo cerâmico no seu eixo vertical (local de aplicação da carga), como é possível ver na Figura 4.22 (a) e (b), verificou-se também corte do tijolo cerâmico junto aos apoios, Figura 4.22 (a). Observou-se que os varões de GFRP não atingiram o ponto de deformação máxima; quando retirados do murete, voltaram ao seu estado original, de forma análoga ao murete MVR1.



(a) face oposta à da aplicação da carga perpendicular ao plano; (b) face de aplicação da carga perpendicular ao plano;

Figura 4.22 - Murete MVR2 após ensaio de carga perpendicular ao plano

#### 4.5.3. Série MVE

O murete MVE1 foi construído com dois varões de GFRP de 9,5 mm exposto ao ambiente alcalino. Este murete resistiu a uma força horizontal de 22,1 kN, com um deslocamento horizontal correspondente de 20,9 mm, como se pode observar na Figura 4.23.

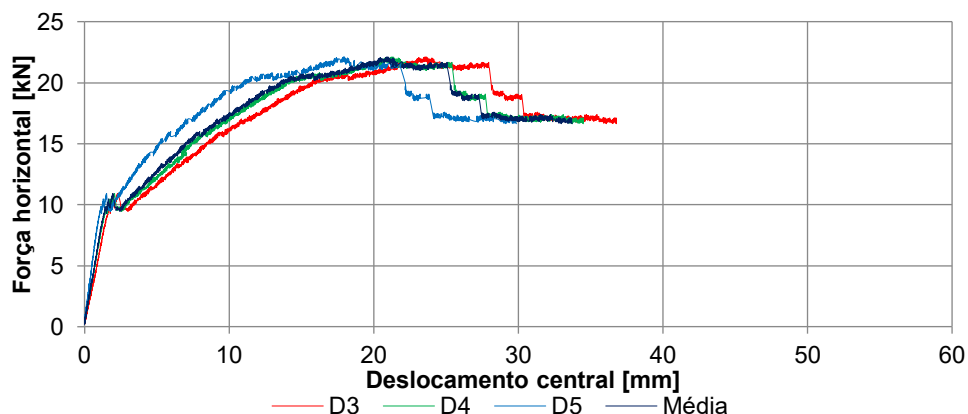


Figura 4.23 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MVE1

Na Figura 4.24, observa-se o diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP colocados nas juntas do murete MVE1. A tensão foi calculada para a força horizontal aplicada no murete e a deformação com recurso ao extensómetro colocado nos varões de GFRP.

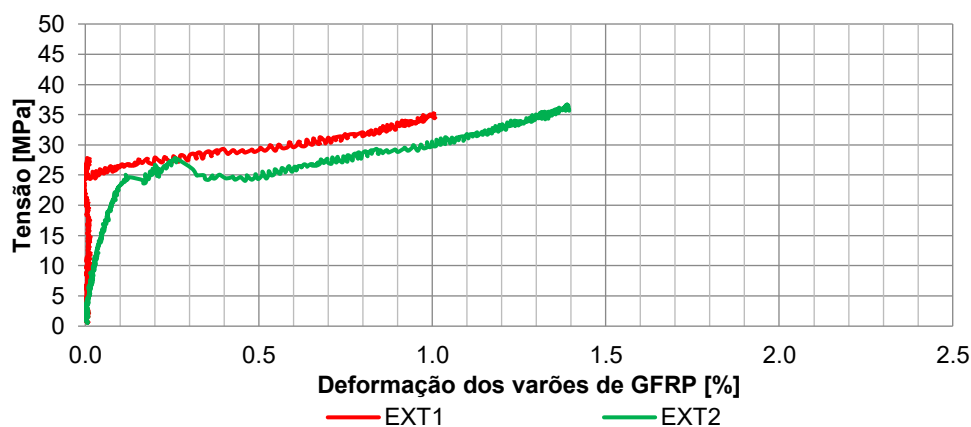
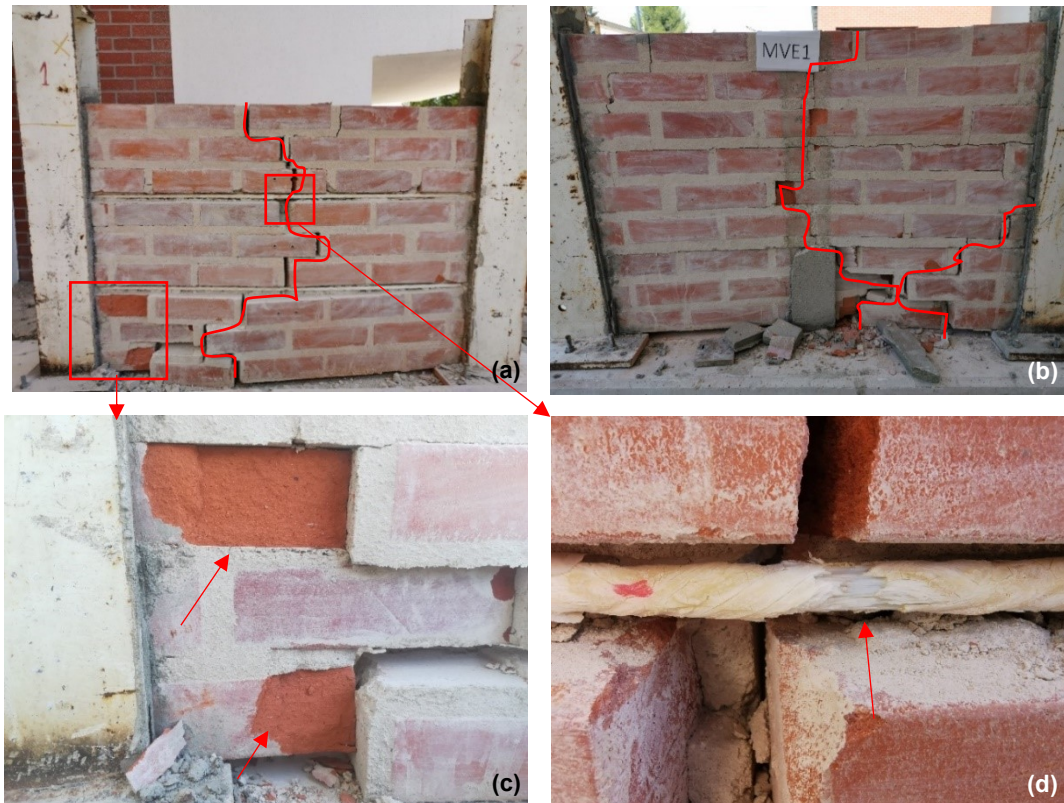


Figura 4.24 - Diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP do murete MVE1

As fissuras foram observadas a partir do tijolo/argamassa, no eixo vertical - Figura 4.25 (a) e (b) - apenas com um tijolo central sujeito a corte, devido ao facto de a bucha aí colocada fragilizar a zona. Os varões de GFRP contribuíram para a resistência até ao fim da experiência; no entanto, o varão de GFRP inserido na junta superior (EXT1) fissurou, como é possível ver na Figura 4.25 (d). De forma semelhante aos restantes muretes, condicionados pelas condições de apoio, este murete registou corte do tijolo cerâmico junto aos apoios, como se pode observar na Figura 4.25 (c).



(a) face oposta à da aplicação da carga perpendicular ao plano; (b) face de aplicação da carga perpendicular ao plano; (c) esmagamento do tijolo cerâmico no canto inferior esquerdo da face oposta à aplicação da carga; (d) varão de GFRP superior fissurado;

Figura 4.25 - Murete MVE1 após ensaio de carga perpendicular ao plano

O murete MVE2, com dois varões GFRP de 9,5 mm expostos ao ambiente alcalino, foi o segundo da série MVE sujeito à carga perpendicular ao plano. Na Figura 4.26, observa-se que este murete registou o seu máximo de resistência à força horizontal aos 13,4 kN, com um deslocamento horizontal médio correspondente de 29,1 mm.

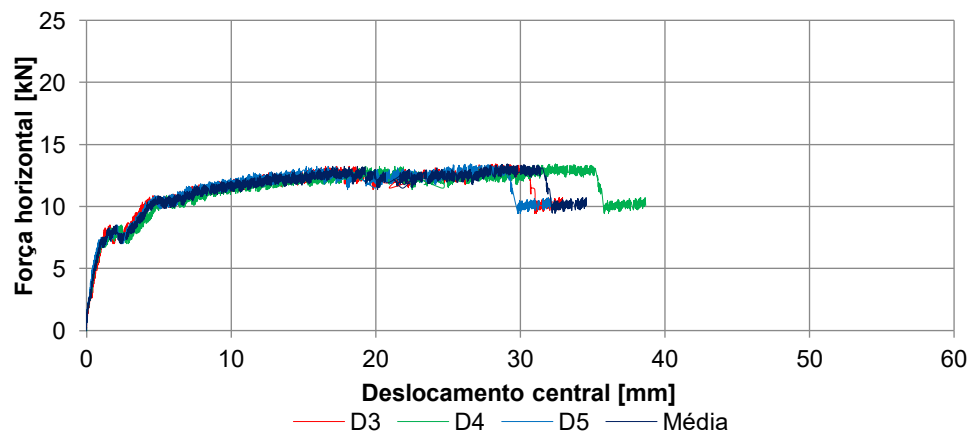


Figura 4.26 - Diagrama de força horizontal-deslocamento do murete MVE2



Na Figura 4.27, observa-se o diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP colocados nas juntas do murete MVE1. A tensão foi calculada para a força horizontal aplicada no murete e a deformação com recurso ao extensómetro colocado nos varões de GFRP. Verifica-se que o varão de GFRP colocado na junta inferior (EXT2) do murete MVE2 deixou de registar deformação prematuramente no ensaio, devido a ter chegado ao ponto de rotura, como é possível ver na Figura 4.28 (c). Este murete, de forma semelhante aos restantes, fissurou na interface tijolo/argamassa, como é possível verificar na Figura 4.28 (a) e (b), e demonstrou esmagamento do tijolo cerâmico junto dos apoios - Figura 4.28 (d).

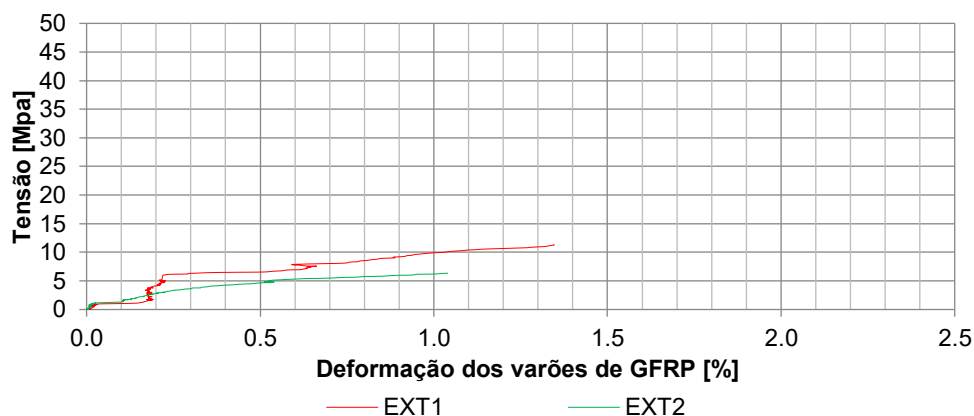


Figura 4.27 - Diagrama tensão-deformação dos varões de GFRP do murete MVE2



(a) face oposta à da aplicação da carga perpendicular ao plano; (b) face de aplicação da carga perpendicular ao plano; (c) varão de GFRP superior; (d) corte do tijolo cerâmico no canto inferior direito da face de aplicação da carga

Figura 4.28 - Murete MVE2 após ensaio de carga perpendicular ao plano



## Capítulo 5

### Análise e discussão de resultados

#### 5.1. Introdução

Neste capítulo, é realizada a discussão de resultados da caracterização física e mecânica dos varões de GFRP e do ensaio em muretes de alvenaria de tijolo com varões de GFRP.

Para caracterização física e mecânica dos varões de GFRP, são apresentados:

- Difusão molecular das soluções nas amostras de GFRP;
- Ensaio de flexão em varões de GFRP;
- Microscópico eletrônico de varrimento (SEM);
- Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ )

Para cada ensaio monotónico em muretes de alvenaria com varões de GFRP, são apresentados:

- Força horizontal máxima ( $F_{H_{max}}$ ) e deslocamento correspondente ( $\delta_H^{FH_{max}}$ );
- Rigidez do murete ( $K$ ), calculada com a seguinte expressão:

$$K = \frac{FH_1}{\delta_H^{FH_1}} \quad [\text{kN/mm}] \quad (5.1)$$

Em que  $FH_1$  é a força horizontal máxima na fase elástica e  $\delta_H^{FH_1}$  é o deslocamento correspondente. A rigidez foi calculada para o intervalo de 60% ( $60\%FH_1$ ) e 30% ( $30\%FH_1$ ) da força máxima para a fase elástica ( $FH_1$ ), Figura 5.1.

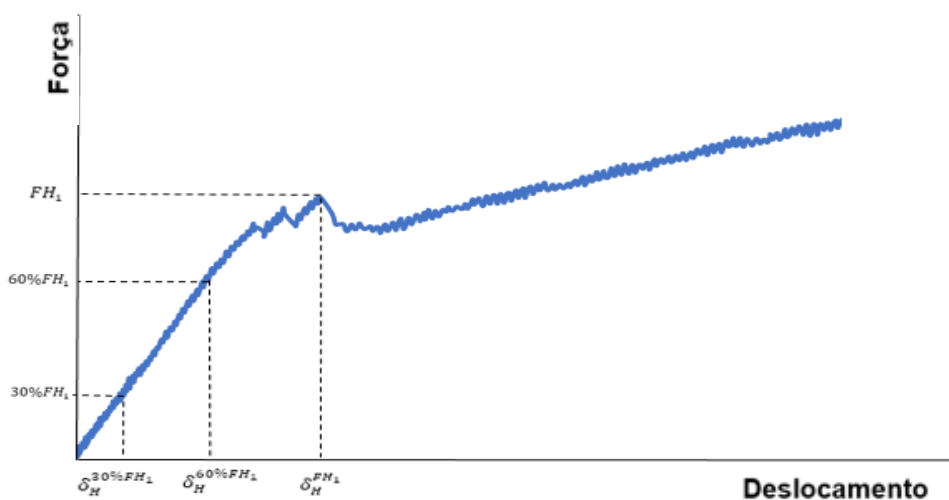


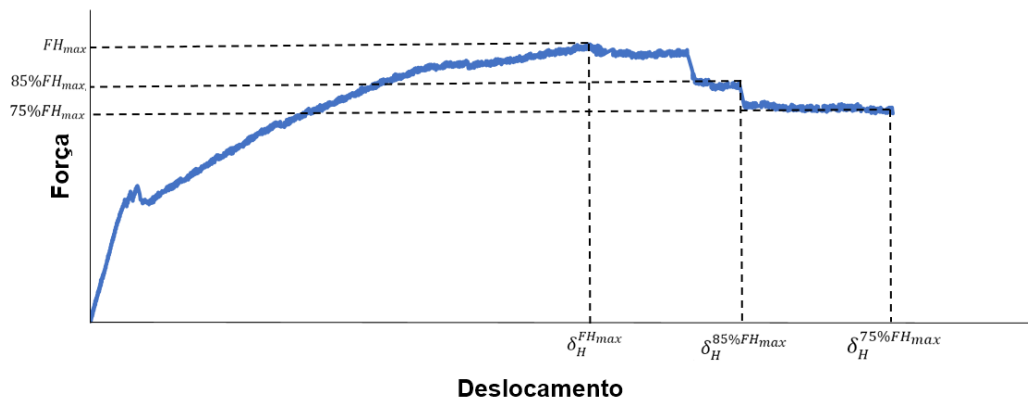
Figura 5.1 - Diagrama de análise da rigidez dos muretes de alvenaria de tijolo cerâmico

- Energia acumulada por deformação ( $U$ ):

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i-1}}{2} \times (\delta_i - \delta_{i-1}) \quad [\text{kN.mm}] \quad (5.2)$$

Em que  $U$  é a energia de deformação, calculada através dos diagramas força-deslocamento por integração numérica, correspondendo  $F_i + F_{i-1}$  às forças horizontais aplicadas ao murete e  $\delta_i - \delta_{i-1}$  os deslocamentos horizontais correspondentes. Esta grandeza é calculada para 100% e 85% da  $FH_{max}$ .

Na Figura 5.2, representa-se um diagrama real do comportamento dos muretes de alvenaria e os valores utilizados para o cálculo das equações anteriormente descritas. Todos os diagramas apresentados (diagramas de força-deslocamento dos muretes de alvenaria) são prolongados até uma perda de capacidade resistente de 25% da força máxima, Figura 5.2.



Para todos os ensaios realiza-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos no presente estudo e outros estudos semelhantes.

## 5.2. Caracterização dos varões de GFRP

### 5.2.1. Difusão molecular das soluções nas amostras de GFRP

As amostras de GFRP foram sujeitas a uma pesagem periódica, permitindo a elaboração de curvas, para análise da variação de massa ao correr do tempo. Na Figura 5.3, encontra-se ilustrada a variação da absorção de água ao longo de 6 meses de envelhecimento acelerado dos varões de GFRP, à temperatura de 60°C e à temperatura ambiente, numa solução salina com concentração de 5% de cloreto de sódio.

Com a análise da Figura 5.3, é possível verificar que os provetes dispõem de uma grande capacidade de absorção no período inicial, sensivelmente até às 2500 horas de exposição. Acompanhando esta variação, é possível verificar que atinge o seu máximo de absorção cerca das 2500 horas, ao que se segue um patamar horizontal que corresponderá à saturação. Assim, os varões apresentam um comportamento Fickiano, tal como verificado no estudo elaborado por Estevão [7].

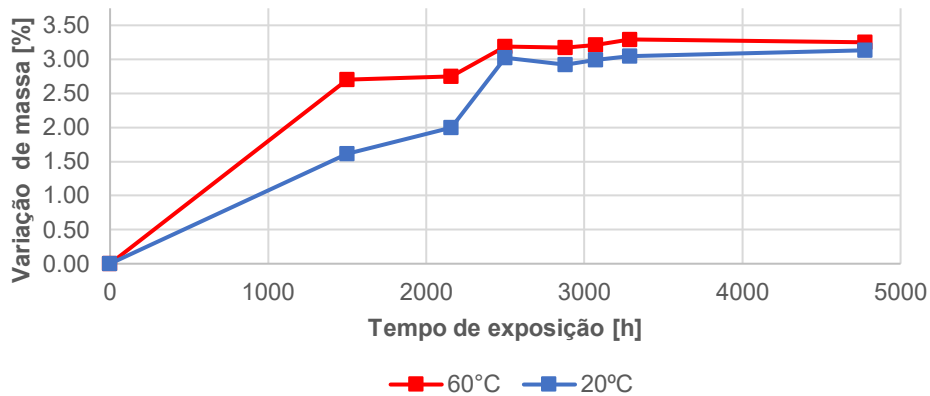


Figura 5.3 - Diagrama de variação média de massa dos varões de GFRP em soluções salinas.

No ambiente com concentração salina à temperatura de 60°C, verifica-se que os provetes registaram uma maior variação de massa em relação aos provetes sujeitos ao ambiente com concentração salina à temperatura ambiente (20°C). Este comportamento seria de prever, dadas as temperaturas elevadas, que favorecerem a difusão de água, de acordo com a lei de Arrhenius.

O ponto de saturação registou-se às 2500 horas com 3,19%, semelhante aos resultados obtidos por Estevão [7], que obteve a saturação das amostras às 2500 horas, mas registou uma absorção menor, apenas 1,8%. Diferença que poderá ser explicada pelo facto de os varões pertencerem a lotes diferentes e com fabricos diferentes. Porém, os resultados situam-se no intervalo obtido no estudo elaborado por [31], que, após 3000 horas, obteve 2,1% e 4,1% de variação de massa para 20°C e 60°C respetivamente.

Ao aproximar-se das 5000 horas, é possível verificar que os provetes, na solução salina e à temperatura de 60°C, tendem para um decréscimo na variação de massa. Este fator estará associado à degradação dos provetes, começando com a perda de massa ser superior ao respetivo ganho. Fenómeno que poderá ser explicado pela perda de massa provocada por reações químicas de conjunto, ambiente e provetes, reação que leva ao aumento da porosidade. Isso possibilita, então, a absorção de água mais facilmente até à matriz-fibra, com os fenómenos de lixiviação e hidrólise, algo de semelhante ao verificado nos estudos realizados por [15, 29].

Na Tabela 5.1, representa-se a difusão individual e média dos provetes de GFRP nos respetivos ambiente de exposição, verifica-se que a difusão aumenta cerca de 1,6 vezes para as amostras expostas à temperatura mais elevada (60°C) em comparação com a temperatura mais baixa (20°C), concluindo-se que a temperatura alta favorece a difusão nas amostras. Comparando com o estudo realizado por Estevão [7], verifica-se que no caso do ambiente salino a 20°C do presente estudo a difusão aumenta em cerca de 2,1 vezes, o que seria de esperar devido à absorção de água nas amostras de GFRP também ser superior. No caso do ambiente com a temperatura mais elevada (60°C) regista-se um aumento de 3,3 vezes em comparação com o estudo realizado por [7] a 20°C ambiente salino, sendo de esperar devido à variação de massa ser superior e observando-se que a temperatura favorece a difusão.

Tabela 5.1 - Difusão nas amostras de varões de GFRP

Tipo de amostra	Ambientes	Amostras	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	Média $\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]
Varão de GFRP com $\phi 10$	Salino 20°C	20°C_1	4,76E-12	4,18E-12
		20°C_2	8,35E-15	
		20°C_3	3,63E-13	
		20°C_4	1,16E-11	
	Salino 60°C	60°C_1	8,74E-13	6,55E-12
		60°C_2	1,55E-12	
		60°C_3	1,84E-11	
		60°C_4	5,36E-12	

Com a análise dos resultados obtidos, foi possível observar que a exposição de provetes de varões de GFRP a temperaturas mais elevadas favorece a difusão da água nos provetes, acelerando a sua degradação, conforme a teoria de Arrhenius. Pode ainda verificar-se que os provetes estão de acordo com a lei de Fick, semelhante ao estudo elaborado por Estevão [7].

### 5.2.2. Ensaio de flexão em varões de GFRP

Para o estudo das propriedades mecânicas das amostras de GFRP sujeitas a ambientes agressivos, foram ensaiados 33 provetes, cujos resultados individuais se encontram no anexo B. Na Figura 5.4, é possível observar o diagrama médio tensão-deformação dos provetes de GFRP ensaiados.

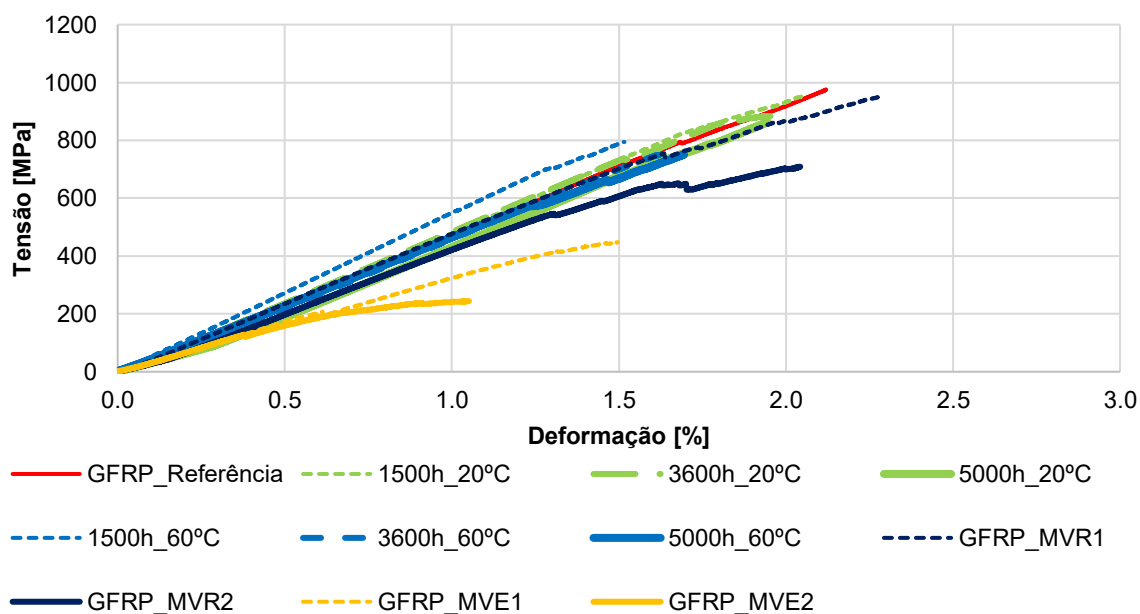


Figura 5.4 - Diagrama médio tensão-deformação médio dos ensaios de flexão nos varões de GFRP

Analisando o diagrama e comparando os resultados das amostras de referência com as amostras sujeitas aos ambientes (salino e alcalino) de 60°C, verifica-se uma notória degradação das propriedades das amostras de GFRP, evidenciando a temperatura elevada (60°C) e o ambiente alcalino (GFRP\_MVE1 e GFRP\_MVE2) como o fator de maior deterioração da capacidade resistente dos provetes.

Na Tabela 5.2, observa-se os resultados médios obtidos para as amostras de GFRP sujeitas ao ambiente salino a 20°C e 60°C, e as amostras retiradas dos muretes que foram sujeitas ao ambiente alcalino a 60°C. De salientar que estas amostras foram colocadas nos muretes, após exposição, e estiveram junto ao DEC FCT NOVA cerca de um ano sujeitas às condições atmosféricas, aumentando a degradação do conjunto murete-varão.

Tabela 5.2 - Resultados médios obtidos nos ensaios de flexão das amostras de varões de GFRP (em ambiente salino a 20°C e 60°C e ambiente alcalino 60°C).

Tempo de exposição	$\sigma_f$ [MPa]	$\varepsilon_f$ [%]	$E_f$ [GPa]
GFRP_referência	974,5	2,1	46,9
1500h_20°C	954,5	2,0	47,7
3600h_20°C	885,2	1,9	46,8
5000h_20°C	863,3	1,9	46,5
1500h_60°C	795,1	1,5	53,6
3600h_60°C	764,0	1,6	47,2
5000h_60°C	751,1	1,7	44,6
GFRP_MVR	828,6	2,1	38,7
GFRP_MVE (alcalino 60°C)	345,9	1,3	26,4

Uma análise da Tabela 5.2 e da Figura 5.5 permite verificar que a tendência para a tensão de rotura em flexão tende a decrescer quando os provetes estão sujeitos a ambientes agressivos, tanto a 20°C como a 60°C. Contudo, a degradação verifica-se mais acentuada no ambiente com temperatura mais elevada de 60°C e alcalino (caso do GFRP\_MVE).

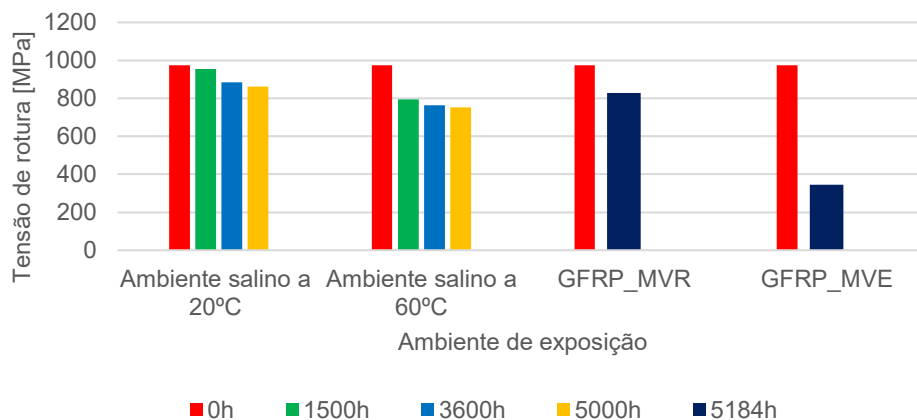


Figura 5.5 - Gráfico da variação da tensão de rotura em flexão das amostras de GFRP

Para as amostras e varões de GFRP expostas à solução salina a 20°C, registou-se uma diminuição de tensão de rotura de 2%, 9% e 11% às 1500, 3600 e 5000 horas respetivamente quando comparada com as amostras referência. No ambiente salino a 60°C, a diminuição verificou-se mais acentuada,

atingindo o seu máximo às 5000 horas, com uma diminuição de 23% da tensão de rotura; já às 1500 e 3600 horas, registou-se uma degradação na ordem de 18% e 22%, respetivamente, quando comparada com o registado nos varões de referência.

No caso do varões retirados dos muretes da serie GFRP\_MVR (varões sem envelhecimento), observa-se uma diferença de 15%, em comparação com as amostras de referência. Diferença que estará associada ao desgaste do ensaio dos muretes e de fissuras de fabrico que este lote apresentava. No caso da serie GFRP\_MVE (ambiente alcalino 60°C) observa-se uma degradação de 65% quando comparados com a referência. Concluindo-se que o ambiente alcalino teve influência na degradação da tensão de rotura em flexão [30].

Comparando as amostras do ambiente salino a 20°C com 5000 horas com as amostras GFRP\_MVR, verifica-se que não existiu degradação relevante da tensão de rotura em flexão. Por outro lado, comparando com a serie GFRP\_MVE, observa-se uma degradação da tensão de rotura em flexão de 60%. Concluindo-se que o a temperatura teve influência na degradação da tensão de rotura em flexão semelhante ao estudo [30].

Comparando as amostras sujeitas ao ambiente salino a 60°C com as amostras dos muretes (MVR e MVE). Observa-se, para o caso das amostras GFRP\_MVR, uma degradação da tensão de rotura em flexão de 10% para as amostras do ambiente salino a 60°C, evidenciando a influência da temperatura na deterioração das amostras. Para o caso das amostras de GFRP\_MVE, verifica-se uma degradação da tensão de rotura em flexão de 54%. Concluindo-se que o ambiente alcalino foi mais prejudicial às amostras de GFRP, quando comparado com o ambiente salino.

Na Figura 5.6, representa-se a oscilação da deformação em flexão das amostras de GFRP. De um modo geral, a deformação tende a diminuir, tanto nos ambientes salinos a 20°C e 60°C como no ambiente alcalino a 60°C.

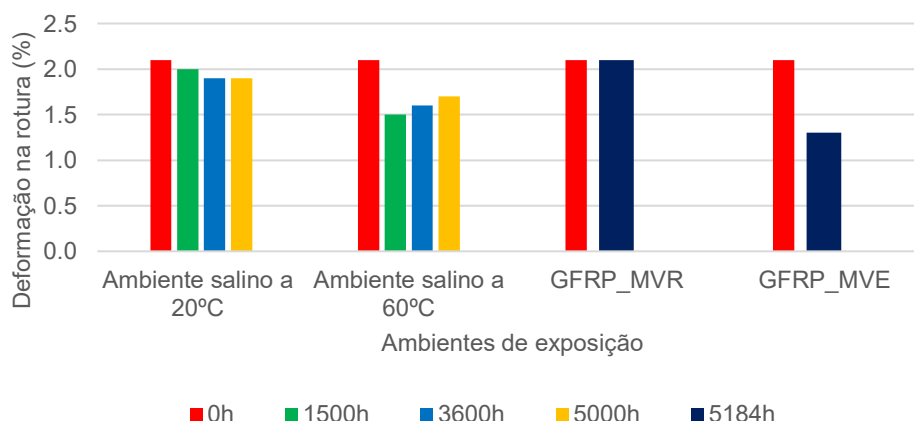


Figura 5.6 - Gráfico da variação da deformação na rotura em flexão das amostras de GFRP

Para o ambiente salino a 20°C, a diminuição da deformação acompanha a tensão de rotura em flexão. Já no ambiente com a temperatura mais elevada com 60°C, a deformação decresce, quando comparada com o registado relativamente à referência ou ao ambiente salino a 20°C, porém, comparando os

resultados nos diferentes tempos para o mesmo ambiente de exposição (ambiente salino a 60°C), é possível verificar uma recuperação desta propriedade, semelhante ao estudo de [28].

Comparando os ambientes mais agressivos com a referência, nomeadamente, ambiente salino a 60°C e ambiente alcalino a 60°C, pode-se verificar que, a maior oscilação da deformação em flexão é no ambiente alcalino.

No módulo de elasticidade em flexão, Figura 5.7, pode verificar-se uma tendência geral para o decréscimo, quando comparados os varões de GFRP em ambientes de exposição salino a 20°C e 60°C e alcalino a 60°C com os varões de GFRP de referência. Porém, existe um aumento no módulo de elasticidade em flexão das amostras sujeitas ao ambiente salino a 60°C, das 0 para as 1500 horas, fenómeno que poderá ser explicado pela presença de fendas de fabrico, aumentando o módulo de elasticidade das amostras de GFRP.

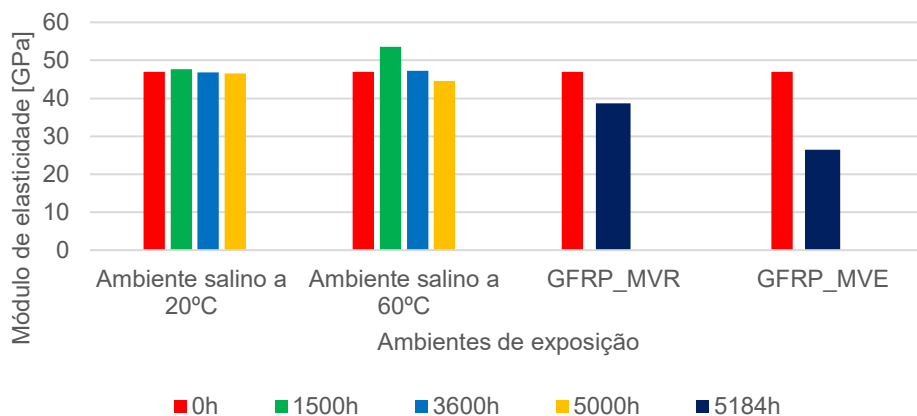


Figura 5.7 - Gráfico da variação do módulo de elasticidade em flexão das amostras de GFRP

No caso das amostras dos muretes nomeadamente GFRP\_MVR e GFRP\_MVE, pode-se verificar que, em comparação com as amostras dos ambientes salinos de 20°C e 60°C, apresentaram uma diminuição do módulo de elasticidade. No caso do GFRP\_MVR esta diminuição do módulo de elasticidade estará associada ao desgaste devido ao ensaio dos muretes. De forma análoga as amostras GFRP\_MVE, apresentaram uma diminuição desta propriedade, em comparação com as amostras analisadas do ambiente salino de 20°C e 60°C, consequência do desgaste no ensaio dos muretes, da exposição ao ambiente alcalino a 60°C e possível degradação devido à exposição às condições atmosféricas do parque do DEC FCT NOVA.

Com a análise das propriedades mecânicas, é possível concluir que a temperatura teve influência na capacidade resistente das amostras de GFRP. Contudo, como se verificou na determinação de Tg, registou-se uma recuperação de propriedades mecânicas visível nas amostras sujeitas ao ambiente salino a 60°C, nomeadamente, do módulo de elasticidade, aspeto que estará associado ao fenómeno de pós-cura das amostras, algo de semelhante ao avançado no estudo [28].

A tensão de rotura em flexão atingiu (no seu ponto máximo, às 5000 horas) a 60°C no ambiente salino, uma degradação significativa de 23%, quando comparada com as amostras de GFRP de referência, ao qual se verificou uma degradação do ambiente salino relevante, semelhante ao estudo elaborado

por [25]. No caso do ambiente alcalino a 60°C, a degradação da tensão de rotura observada foi de 65% às 5184 horas, concluindo-se que este ambiente foi o mais prejudicial às amostras de GFRP.

Os resultados obtidos no ensaio em flexão das 33 amostras de GFRP sujeitas aos ambientes de envelhecimento acelerado levam a concluir que as amostras são suscetíveis à degradação das propriedades mecânicas, nomeadamente tensão de rotura, deformação e módulo de elasticidade em flexão, quando sujeitas aos ambientes com temperaturas mais elevada e a ambientes salinos e alcalinos.

Contudo, observou-se uma maior degradação para 60°C do que para 20°C quando comparados ambientes iguais (ambiente salino). Para o caso das amostras sujeitas a ambientes diferentes com temperaturas iguais, nomeadamente ambiente salino e alcalino a 60°C, verificou-se que o ambiente alcalino foi o mais prejudicial para as amostras de GFRP.

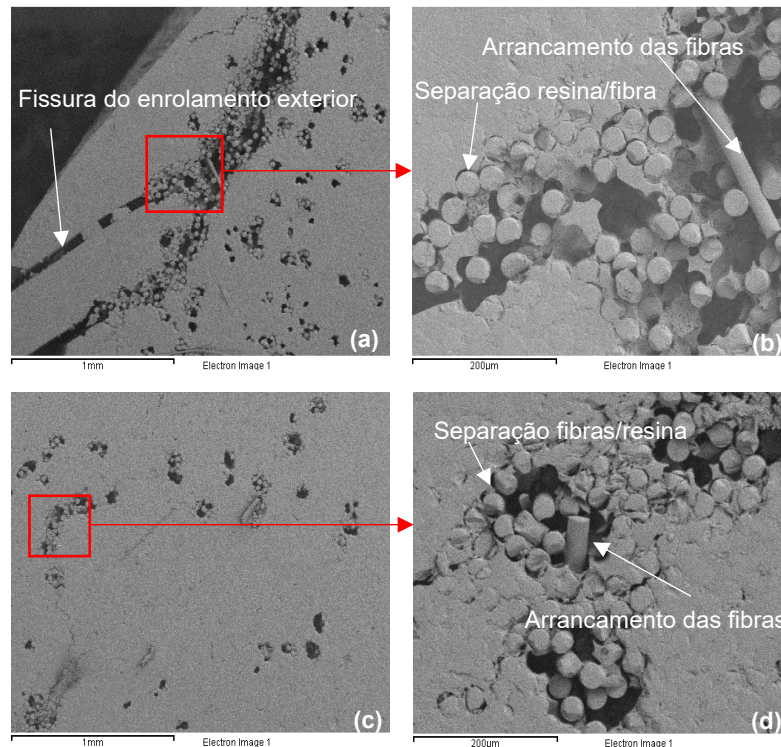
### **5.2.3. Microscópio de varrimento eletrónico (SEM)**

Para a análise da degradação dos varões de GFRP expostos aos ambientes de exposição, foi realizado um estudo recorrendo ao microscópico ótico, seguido do microscópico de varrimento eletrónico, de modo a observar o impacto que os ambientes produziram nas fibras e na resina dos varões de GFRP. As amostras foram preparadas com cortes na direção transversal e longitudinal às fibras, sendo possível analisar em SEM toda a estrutura do varão de GFRP, avaliando a degradação das amostras expostas aos ambientes de envelhecimento acelerado a 20°C e 60°C numa solução salina.

#### **5.2.3.1. Imagens transversais das amostras de GFRP analisadas em SEM**

Na Figura 5.8, podem observar-se as imagens obtidas nos ensaios SEM para as amostras de varões de GFRP expostas ao ambiente, com uma concentração de 5% de NaCl a 60°C e à temperatura ambiente. Foram realizadas amostras na periferia e no centro da amostra, com um *zoom* de 45 e 200  $\mu\text{m}$ , de modo a analisar a degradação. Com a análise às observações realizadas, foi possível verificar que a degradação se infiltrou através de canais formados pela deterioração e fissuração da resina de enroscamento exterior do varão de GFRP, identificada na Figura 5.8 (a). Esta degradação prossegue para o núcleo do varão, começando por degradar o elo mais fraco, a ligação resina-fibra, diminuindo a densidade das fibras e da resina e extraíndo fibras, como é possível verificar na Figura 5.8 (b), em que é visível o caminho de degradação que desagrega os componentes das amostras. Na Figura 5.8 (c), é possível observar que a degradação no centro da amostra de GFRP, verifica-se que esta degradação é menor do que na periferia, como se pode ver na Figura 5.8 (d), em que a densidade das fibras e da resina é maior do que na Figura 5.8 (b). No entanto, verificam-se os mesmos fenómenos de degradação, arrancamento e separação de resina/fibra. Esta amostra teve um período de exposição de apenas 1500 horas, relativamente curto, o que explica uma maior degradação na periferia do que no centro.

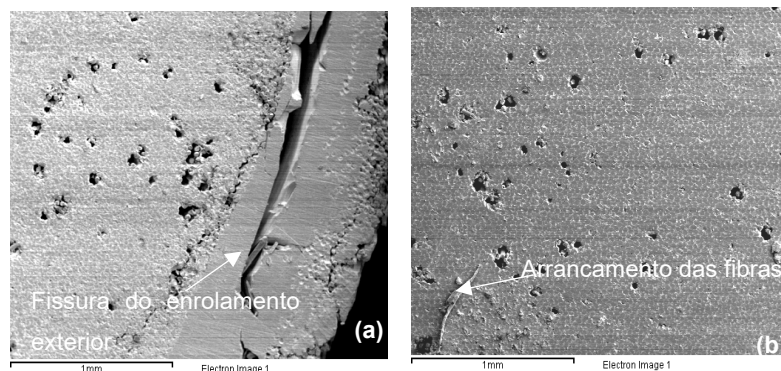




(a) periferia da amostra após 1500 horas de exposição, com *zoom* de 45 µm; (b) periferia da amostra após 1500 horas de exposição, com *zoom* de 200 µm; (c) centro da amostra após 1500 horas de exposição, com *zoom* de 45 µm; (d) centro da amostra após 1500 horas de exposição, com *zoom* de 200 µm

Figura 5.8 - Imagens SEM de amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura ambiente

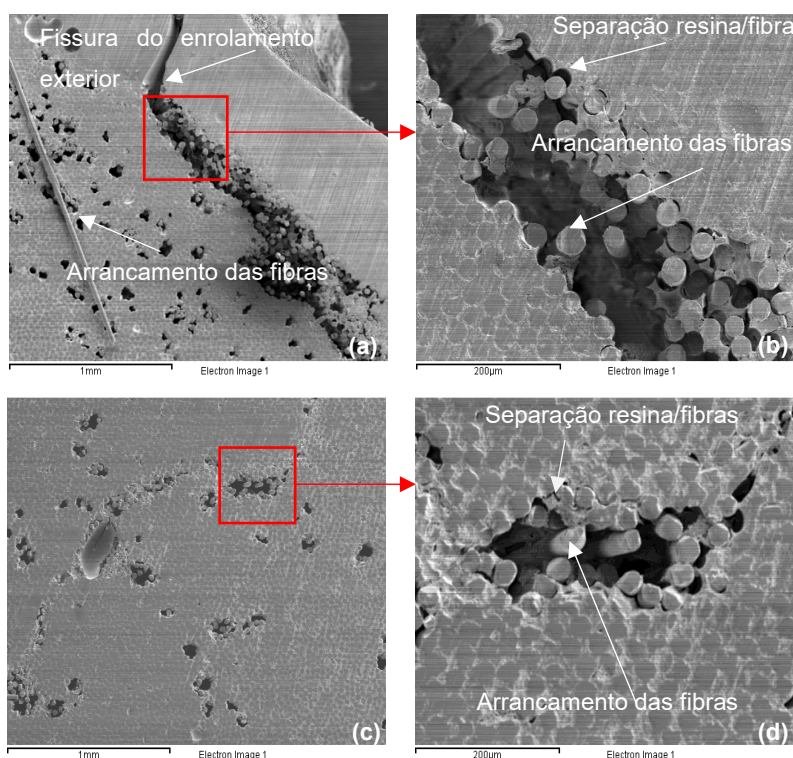
Na Figura 5.9 (a), apresenta-se imagens SEM de amostras com 5000 horas a 20°C. Tal como na amostra anterior de 1500 horas, é possível ver o caminho da infiltração e deterioração da resina de proteção (o enrolamento exterior) associada à quebra da resina. A imagem, Figura 5.9 (b), com foco no centro da amostra de GFRP com um *zoom* de 45 µm, tal como a amostra anterior de 1500 horas, não apresenta degradação significativa, verificando-se apenas fibras soltas. Analisando a Figura 5.9 e comparando-a com a Figura 5.8, é possível verificar que a degradação das amostras de GFRP não teve evolução visível para o ambiente de exposição salino a 20°C.



(a) periferia da amostra com 5000 horas de exposição, com *zoom* de 45 µm; (b) centro da amostra com 5000 horas de exposição, com *zoom* de 45 µm

Figura 5.9 - Imagens SEM de amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura ambiente

Na imagem, Figura 5.10, é possível observar a degradação da amostra de GFRP exposta a um ambiente salino à temperatura de 60°C, durante 1500 horas - imagens na periferia Figura 5.10 (a) e (c) e no centro Figura 5.10 (c) e (d). Na periferia, é possível observar os canais de infiltração que resultam da deterioração na interface resina/fibra, criando mesmo vazios sem fibras, a separação entre a resina e fibras e o arrancamento das fibras, como se pode observar Figura 5.10 (b). No centro, Figura 5.10 (c), é possível observar alguns vazios, porém, a degradação é pouco notória, podendo observar-se que o tempo de exposição de 1500 horas não foi o suficiente para a degradação evoluir até ao centro da amostras, tal como observado na Figura 5.8 (c) e (d). No entanto, verifica-se na Figura 5.10 (d) o arrancamento das fibras e a separação entre a resina e as fibras.

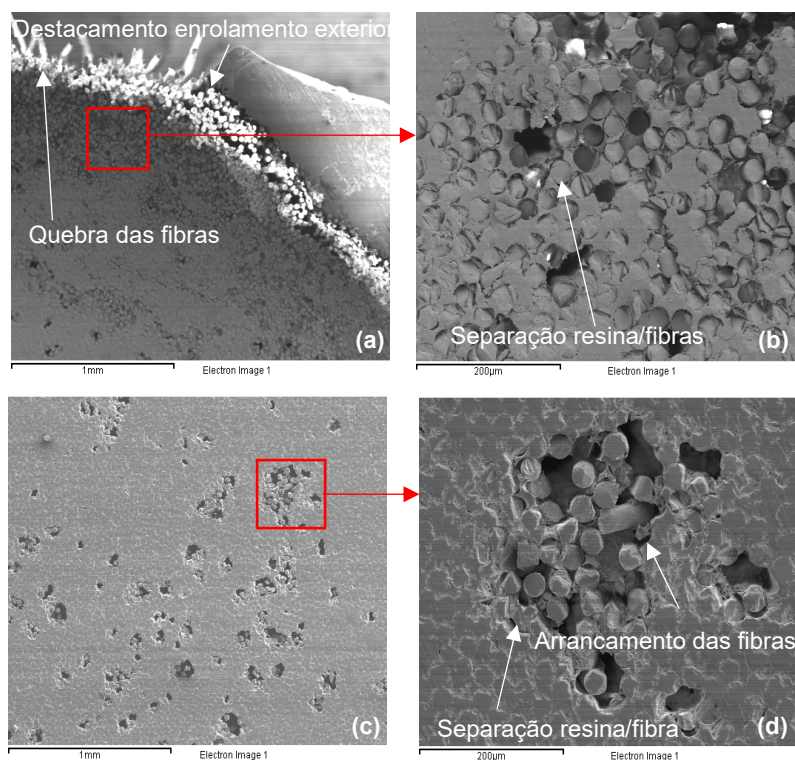


(a) periferia da amostra com 1500 horas de exposição, com zoom de 45 µm; (b) periferia da amostra com 1500 horas de exposição, com zoom de 200 µm; (c) amostra com 1500 horas de exposição, com zoom de 45 µm; (d) Centro da amostra com 1500 horas de exposição, com zoom de 200 µm

Figura 5.10 - Imagens SEM de amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura de 60° C

As amostras seguintes, Figura 5.11, correspondem à amostra com maior tempo de exposição (cerca de 5000 horas) a um ambiente agressivo com uma concentração salina à temperatura de 60°C - imagens SEM da periferia da amostra de GFRP na Figura 5.11 (a) e (b) e do centro da amostra de GFRP na Figura 5.11 (c) e (d). Na Figura 5.11 (a), é possível observar uma grande degradação da amostra de GFRP, associada à perda completa da resina da proteção envolvente, o que provocou uma grande exposição do núcleo do varão de GFRP e uma elevada perda de densidade de resina, fibras partidas e interface, como se pode observar na Figura 5.11 (b), em que praticamente toda a imagem SEM mostra a degradação. No centro da amostra - Figura 5.11 (c) e (d) - e tal como as amostras anteriores,

a degradação não é visível, apenas com vazios, muito pontuais, e alguma deterioração da interface resina/fibra e arrancamento de fibras.



(a) periferia da amostra com 5000 horas de exposição, com zoom de 45 µm; (b) periferia da amostra com 5000 horas de exposição, com zoom de 200 µm; (c) centro da amostra com 5000 horas de exposição, com zoom de 45 µm; (d) centro da amostra com 5000 horas de exposição, com zoom de 200 µm

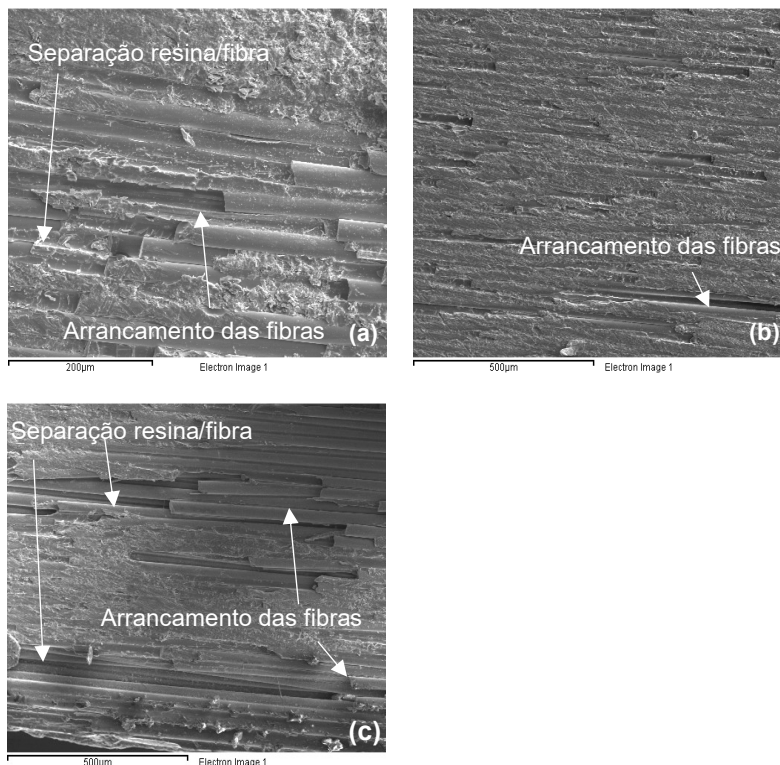
Figura 5.11 - Imagens SEM de amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura de 60°C

### 5.2.3.2. Imagens longitudinais das amostras de GFRP analisadas em SEM

Na Figura 5.12, é possível observar a amostra de GFRP de referência, ou seja, sem qualquer tipo de exposição a ambiente agressivo. As amostras de GFRP foram analisadas na periferia como se pode observar na Figura 5.12 (a), no centro, Figura 5.12 (b), e na periferia oposta à anteriormente descrita como se pode observar na Figura 5.12 (c).

Nas imagens longitudinais da amostra de GFRP, ao centro (Figura 5.12 (a)) e na periferia (Figura 5.12 (b) e (c)), e apesar de ser amostra de referência e sem qualquer tipo de exposição a ambientes agressivos, é possível observar a presença de vazios, destacamento de fibras e desagregação da resina e interface resina/fibra. Esta degradação verificada poderá ter sido consequência do corte realizado ou apenas defeitos de fabrico.



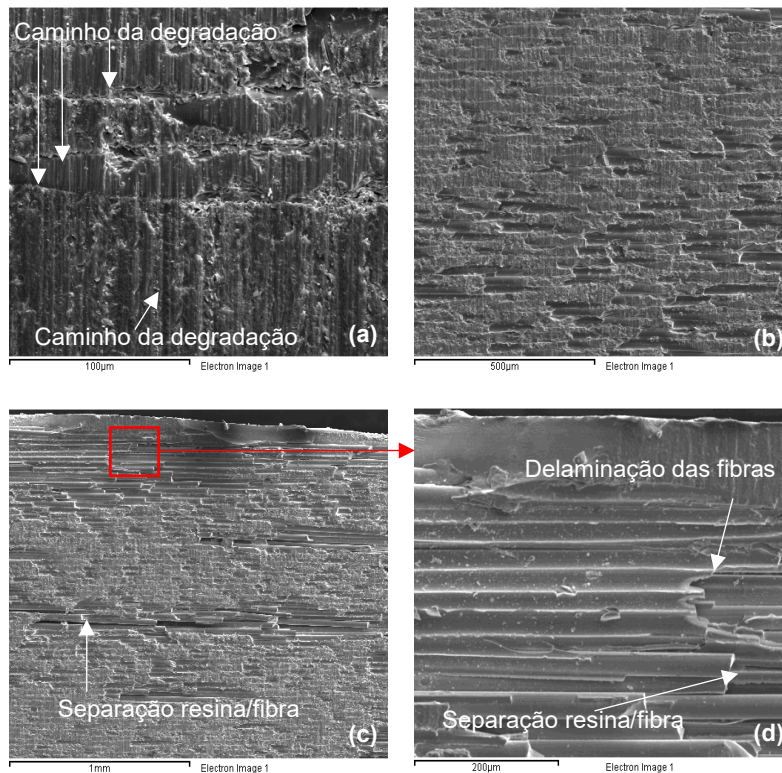


(a) periferia da amostra de referência, com zoom de 200 µm; (b) centro da referência, com zoom de 500 µm; (c) periferia da amostra de referência, com zoom de 500µm;

Figura 5.12 - Imagens SEM de corte longitudinal em amostras GFRP de referência

Na Figura 5.13, é possível observar a degradação da amostra de GFRP correspondem à amostra com maior tempo de exposição (cerca de 5000 horas) a um ambiente agressivo com uma concentração salina à temperatura de 60°C. As amostras de GFRP foram analisadas na periferia com se pode observar na Figura 5.13 (a), no centro ( Figura 5.13 (b)), na periferia oposta à anteriormente descrita como se pode observar na Figura 5.13 (c), sendo efetuado um zoom como se pode observar na Figura 5.13 (d). Nas imagens longitudinais os possíveis sinais de degradação encontrados podem ser consequência do corte realizado ou apenas defeitos de fabrico., as amostras analisadas são representativas dos provetes, podendo existir pontos com maior nível de degradação. Contudo, comparando as imagens de 5000 horas (Figura 5.13) com as de referência (Figura 5.12) verifica-se que existe um aumento dos sinais de degradação.

Na Figura 5.13 (a) é possível verificar os caminhos da degradação, semelhante ao identificado nas imagens transversais (na zona do enrolamento exterior) e com penetração para o centro da amostra. Na Figura 5.13 (b), comparando com a Figura 5.12 (b), verifica-se um aumento da degradação da amostra, sendo visível o aumento de vazios nas imagens. Na Figura 5.13 (c), observa-se uma diminuição da densidade de resina e fibras sendo mais acentuada a diminuição da densidade de resina no enrolamento exterior, como se pode observar na Figura 5.13 (d). Comparando a Figura 5.12 (a) com a Figura 5.13 (d) verifica-se que existe uma perda significativa da resina para a amostra sujeita a 5000 horas no ambiente salino a 60°C.



(a) periferia da amostra de GFRP, com zoom de 100 μm; (b) centro amostra de GFRP, com zoom de 500 μm; (c) periferia da amostra de GFRP, com zoom de 500 μm; (d) periferia da amostra de GFRP com zoom de 200 μm

Figura 5.13 - Imagens SEM de corte longitudinal em amostras GFRP que foram sujeitas a um ambiente de exposição com uma concentração salina à temperatura de 60°C e a 5000 horas

### 5.2.3.3. Considerações finais do ensaio SEM em amostras de GFRP

Nas imagens SEM das amostras de GFRP obtidas no presente trabalho, observou-se que a degradação afetou principalmente a periferia e, com menos intensidade, o centro de todas as amostras. De um modo geral, foi nas amostras expostas ao ambiente salino à temperatura de 60°C que se observou maior degradação, nomeadamente às 5000 horas. Porém, foi nesta amostra que a resina de enrolamento se destacou, podendo ter sido a temperatura elevada ou pequenos defeitos de fabrico o motivo causador desta degradação.

No centro das amostras, quer a 1500 ou a 5000 horas, à temperatura ambiente ou a 60°C, a resina e as fibras demonstraram pouca alteração, relativamente às amostras analisadas (uma amostra representativa do varão de fibra de vidro). Existiu, porém, um destacamento das fibras, devido à degradação da interface, algo de semelhante ao verificado no estudo de [32].

Degradação semelhante foi observada no estudo efetuado por Estevão [7], em que a maior zona de degradação foi a periferia das amostras de GFRP, na zona do enrolamento em espiral. No caso estudado, verificou-se que o enrolamento espiral exterior influenciou a degradação das amostras. Tal como observado, foi a amostra em que o enrolamento exterior se desagregou que apresentou o maior nível de degradação, sendo também a amostra sujeita maior temperatura. Observa-se que a temperatura elevada influenciou a degradação das amostras, dependendo da resistência do enrolamento exterior.

#### 5.2.4. Temperatura de transição vítrea (Tg)

Com a realização do DSC, obteve-se a temperatura de transição vítrea para os provetes de GFRP, em ambientes de envelhecimento acelerado, nomeadamente a 60°C e à temperatura ambiente (20°C), ambos numa solução com concentração de 5% de NaCl. Na Figura 5.14, pode verificar-se que a Tg diminui com o aumento da exposição, sendo este decréscimo mais notável para os provetes sujeitos à temperatura de 60°C. Comparando com a referência às zero horas, os provetes sujeitos ao ambiente com a temperatura mais alta decrescem cerca de 9.7%, enquanto os provetes sujeitos à temperatura ambiente decrescem cerca de 7.5%, ambos às 3600 horas. Esta diminuição deve-se à absorção de água originar o fenómeno de plasticização da matriz que, aliada à alta temperatura, favorece a degradação desta grandeza.

Na Figura 5.14 observa-se ainda que, às 5000 horas, existe uma recuperação da grandeza analisada dos provetes sujeitos à temperatura mais alta em cerca de 3%. Fator que estará associado a fenómenos de pós-cura e atenuação da plasticização da matriz com o prolongar tempo de exposição como verificado em [24].

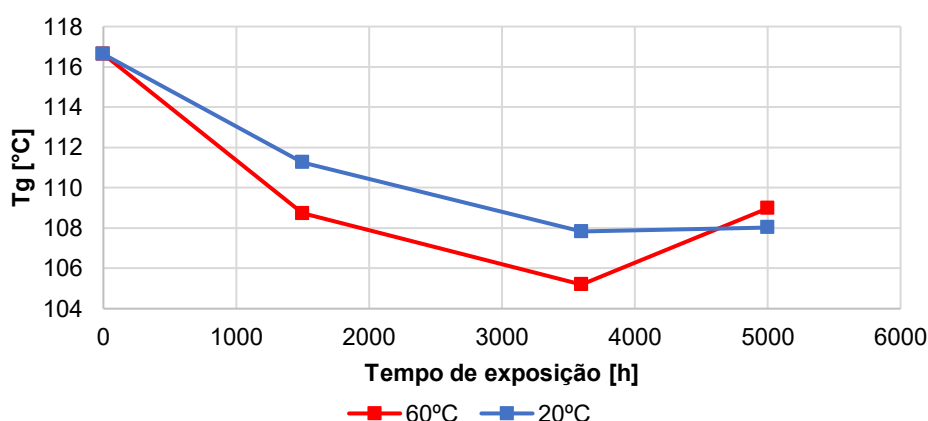


Figura 5.14 - Diagrama da Tg dos varões de GFRP em soluções salinas

Com a análise dos resultados, verifica-se que o ambiente salino e as temperaturas de 60°C e 20°C não produziram efeitos significativos na temperatura de transição vítrea dos provetes de GFRP, resultante dos valores de degradação serem de pequena e aceitável variação. Resultados semelhantes foram obtidos no estudo realizado por Estevão [7].

#### 5.2.5. Considerações finais dos ensaios de caracterização de varões de GFRP

Analisando a Figura 5.11 (a) e a Figura 5.13, a amostra de GFRP sujeita ao ambiente salino a 60°C com 5000 horas e comparando com o estudo da difusão, Tabela 5.1, e o ensaio de flexão, Tabela 5.2, da mesma amostra, observa-se que o ambiente levou ao destacamento do enrolamento exterior, favorecendo a difusão e diminuindo, significativamente, a resistência à flexão. Verifica-se que a temperatura elevada foi prejudicial às amostras testadas, tendo impacto significativo na degradação das suas propriedades mecânicas.

### 5.3. Ensaio da carga perpendicular ao plano em muretes de alvenaria

Nesta secção são analisados e comparados os resultados obtidos nos muretes de alvenaria com e sem varões de GFRP nas suas juntas horizontais.

#### 5.3.1. Série MSV

Na Figura 5.15, representa-se o diagrama de força-deslocamento relativo aos ensaios nos muretes de alvenaria de referência, sem varões de GFRP, MSV1 e MSV2. Na Tabela 5.3, é possível ver o resumo do comportamento mecânico dos muretes sujeitos ao ensaio de carga monotónica perpendicular ao seu plano.

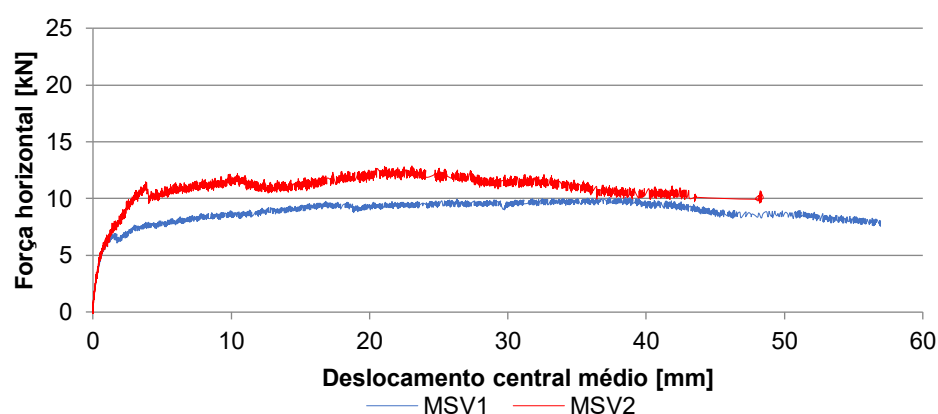


Figura 5.15 - Diagrama de força horizontal-deslocamento nos muretes MSV1 e MSV2

Tabela 5.3 - Comportamento mecânico dos muretes MSV1 e MSV2

Murete	$FH_{max}$ [kN]	$\delta_H^{FH_{max}}$ [mm]	K [kN/mm]	U [kN.mm]	
				100% $FH_{max}$	85% $FH_{max}$
MSV1	10,1	38,5	6,0	342,2	393,9
MSV2	12,9	23,0	3,8	248,6	322,2
Média	11,5	30,8	4,9	295,4	358,1

Esta série de referência, MSV1 e MSV2, começou a apresentar fissuras na interface tijolo/argamassa e desagregação da alvenaria desde o início do ensaio de carga monotónica. Conduzindo à rotura por flexão da alvenaria, semelhante ao do estudo elaborado por [37].

O comportamento mecânico representado na Tabela 5.3 será utilizado como termo de comparação com as soluções dos muretes com GFRP nas suas juntas horizontais. Conseguindo-se determinar a influência que os varões no seu estado original, caso do murete MVR, e envelhecidos no caso do murete MVE, tiveram no comportamento do murete quando sujeito à carga monotónica horizontal.

### 5.3.2. Série MVR

Na Figura 5.16, representa-se o gráfico de força-deslocamento relativo aos ensaios nos muretes de alvenaria com varões de GFRP, MRV1 e MRV2, e, na Tabela 5.4, comparam-se os resultados obtidos.

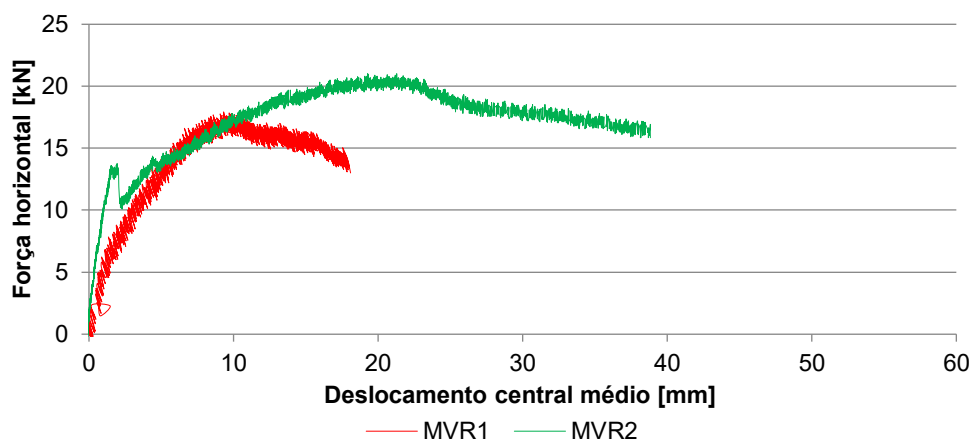


Figura 5.16 - Diagrama de força horizontal-deslocamento nos muretes MVR1 e MVR2

Tabela 5.4 - Comportamento mecânico dos muretes MVR1 e MVR2

Murete	$FH_{max}$ [kN]	$\delta_H^{FH_{max}}$ [mm]	K [kN/mm]	U [kN.mm]	
				100% $Fh_{max}$	85% $Fh_{max}$
MVR1	17,9	9,7	3,3	118,4	158,4
MVR2	21,0	19,3	8,6	350,2	467,6
Média	19,5	14,5	5,95	234,3	313,0

De acordo com os resultados obtidos - Tabela 5.4 - e comparando o MVR1 com o MVR2, é possível verificar que existe uma discrepância no deslocamento máximo, na energia acumulada e na rigidez. Sendo a energia acumulada definida através da área entre o deslocamento e a força horizontal analisada na Figura 5.16, é possível verificar que existe um deslocamento menor no caso do murete MVR1, de apenas 9,7 mm, quando comparado com o MVR2, que registou 19,3 mm, como se pode ver na Tabela 5.4.

De salientar que, durante este ensaio, existiu uma rotação do dispositivo de aplicação de carga no murete MVR1, concentrado a força aplicada apenas na parte de cima do murete, como é possível ver na Figura 4.19. Isto causou a interrupção do ensaio, por segurança; no entanto, este murete foi testado até à sua capacidade de máxima, mas com uma discrepância, ao comparar com o MVR2, no valor da rigidez, diminuindo de 8,6 para 3,3 [kN/mm].

O modo de rotura do murete MVR1 foi controlado por fissuras centrais, no eixo vertical do murete, na interface tijolo/argamassa e esmagamento dos tijolos nos apoios. Conduzindo à rotura por flexão, de forma análoga à série de referência (MSV) e ao sucedido no estudo elaborado por [37]. No caso do



murete MVR2, observou-se que o modo de rotura foi controlado pelo corte do tijolo cerâmico, observando-se uma rotura por flexão e corte da alvenaria semelhante a [37, 38]. Durante o ensaio, foi também registado um destacamento da argamassa nas juntas onde foram colocados os varões de GFRP, resultado de tensões de corte entre varão-argamassa de GFRP, semelhante ao estudo [36].

Na Tabela 5.5, comparam-se os resultados médios obtidos dos muretes MVR e dos muretes de referência MSV, podendo verificar-se uma melhoria notória das características descritas, com exceção da energia acumulada e do deslocamento horizontal.

Tabela 5.5 - Comparação dos resultados médios obtidos nos ensaios de carga perpendicular ao plano dos muretes MVR com MSV

Murete	$FH_{max}$ [kN]	$\delta_H^{FH_{max}}$ [mm]	K [kN/mm]	U [kN.mm]	
				100% $Fh_{max}$	85% $Fh_{max}$
MVR	19,5	14,5	5,5	234,3	313,0
MSV (Referência)	11,5	30,8	4,9	295,4	358,1
MVR / MSV	1,7	0,5	1,2	0,8	0,9

Comparando a solução MVR (com varões de GFRP) com a solução de referência MSV (sem varões de GFRP), é possível verificar que existiu um aumento de resistência à força horizontal de 1,7 vezes, de 11,5 kN para 19,5 kN, como se pode observar na Tabela 5.5. Associado a este incremento de resistência à força horizontal, o deslocamento horizontal correspondente diminuiu de 30,8 mm para 14,5 mm, sendo que o murete chegou ao fim do ensaio com maior integridade, quando comparado com os muretes de referência.

A colocação dos varões, de acordo com os resultados obtidos, conduziu a um aumento da rigidez em 1,2 vezes, evidenciando o contributo dos varões de GFRP para a melhoria do conjunto murete-varão à resistência à carga horizontal aplicada.

Com a análise a esta série de muretes (MVR), que teve na sua composição os varões de GFRP sem qualquer tipo de degradação prévia, pode verificar-se a influência notória dos varões no aumento das características mecânicas dos muretes MVR (nomeadamente: o aumento da resistência à força horizontal, da rigidez, da diminuição do deslocamento horizontal e da energia acumulada).

Analisando apenas o murete MVR2, não considerando o murete MVR1 devido à rotação do dispositivo de aplicação de carga, a energia dissipada aumenta de 295,4 para 350,2 [kN.mm] e a rigidez com o aumento de 1,8 vezes, podendo concluir-se que a utilização de varões de GFRP melhora o comportamento dos muretes, aumentando a resistência, mantendo a integridade e diminuindo a queda de detritos, algo de semelhante ao verificado no estudo de [37].

### 5.3.3. Série MVE

Na Figura 5.17, é apresentada a força média do murete o deslocamento médio correspondente. Na Tabela 5.6, apresenta-se, adicionalmente à força horizontal máxima e deslocamento corresponde, a energia dissipada e a rigidez do murete MVE.

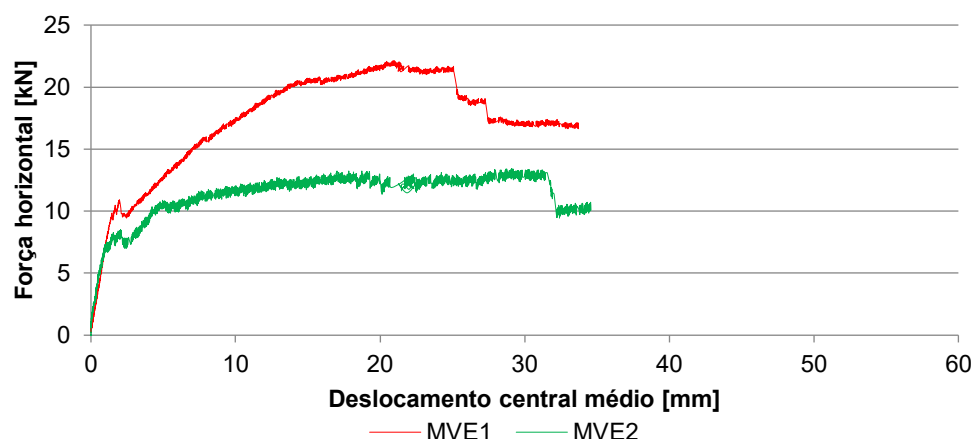


Figura 5.17 - Diagrama de força horizontal-deslocamento nos muretes MVE1 e MVE2

Tabela 5.6 - Comportamento mecânico do murete MVE1 E MVE2

Murete	$F_{h_{max}}$ [kN]	$\delta_H^{F_{h_{max}}}$ [mm]	K [kN/mm]	U [kN.mm]	
				100% $F_{h_{max}}$	85% $F_{h_{max}}$
MVE1	22,1	20,9	7,6	344,5	445,6
MVE2	13,4	29,1	7,9	330,0	365,1
Média	17,8	25,0	7,8	337,3	405,4

Com a observação dos resultados obtidos do murete MVE1 e MVE2, com varões de GFRP sujeitos a ambiente alcalino a 60°C, é possível verificar um comportamento semelhante ao nível de rigidez e energia acumulada. O MVE1 registou uma maior capacidade de resistir à força horizontal quando comparado com os outros muretes, com um valor de 22,1 kN, verificando-se que o ambiente alcalino utilizado para o envelhecimento acelerado teve influência na resistência dos varões de GFRP à força horizontal aplicada. O murete MVE2 registou valores de carga e de deslocamento aproximados à série sem varões (MSV), o que se deve ao facto de o varão de GFRP ter chegado à rotura no início do ensaio, como é possível observar na Figura 4.28 (c), deixando de contribuir para a resistência à força horizontal o que influenciou a rotura do murete, semelhante ao estudo elaborado por [35].

O modo de rotura, no caso do MVE2, foi controlado pela rotura do GFRP, seguido de fissuras centrais na interface tijolo/argamassa no eixo vertical e esmagamento do tijolo nos apoios, algo de semelhante ao registado no estudo elaborado por [37]. Contudo, observou-se um rotura por flexão, para ambos, semelhante ao estudo de [37]. Os varões de GFRP colocados nas juntas conduziram ao destacamento de argamassa, semelhante à série MVR e ao estudo realizado por [36].

Na Tabela 5.7, comparam-se os resultados médios obtidos nos muretes MVE com os dos muretes de referência MSV, podendo verificar-se uma melhoria notória em todas as características analisadas.

Tabela 5.7 - Comparação dos resultados médios obtidos nos ensaios de carga perpendicular ao plano dos muretes MVE com MSV

Murete	$FH_{max}$ [kN]	$\delta_H^{Fh_{max}}$ [mm]	K [kN/mm]	U [kN.mm]	
				100% $Fh_{max}$	85% $Fh_{max}$
MVE	17,8	25,0	7,8	337,3	405,4
MSV (Referência)	11,5	30,8	4,9	295,4	358,1
MVE / MSV	1,6	0,8	1,6	1,1	1,1

Com a análise a esta série de muretes, que teve na sua composição os varões de GFRP sujeitos a um ambiente alcalino a 60°C, pode verificar-se a influência notória dos varões no aumento das características mecânicas dos muretes MVE nomeadamente: o aumento da resistência à força horizontal em 1,6 vezes, da rigidez em 1,6 vezes, da energia dissipada em 1,1 e da diminuição do deslocamento correspondente à força máxima obtida. Pode observar-se que a utilização de varões de GFRP melhora o comportamento dos muretes, aumentando a resistência à força horizontal, algo de semelhante ao verificado no estudo de [37]. Verifica-se que a degradação dos varões de GFRP colocados nos muretes não teve influência nas características analisadas, sendo o MVE1 com 22,1 kN, maior resistência à força horizontal aplicada.

#### 5.3.4. Comparação de resultados obtidos nos ensaios dos muretes de alvenaria

Na Figura 5.18, apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de carga perpendicular ao plano, nomeadamente: força horizontal máxima e deslocamento correspondente. Verifica-se que os muretes com varões de GFRP (MVR e MVE) apresentam um aumento significativo na resistência à força horizontal ao seu plano e diminuição do deslocamento correspondente, comparando com o dos muretes de referência MSV.

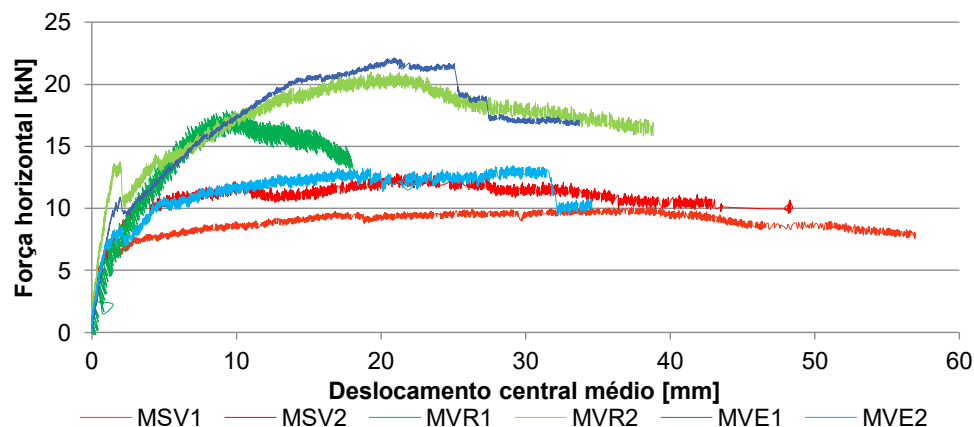


Figura 5.18 - Diagrama de força horizontal-deslocamento dos muretes de referência e das soluções com varões de GFRP

Analisando o diagrama força-deslocamento, os muretes MVE1 e MVE2 com varões envelhecimentos conduziram a dois resultados completamente distintos, inclusive o MVE1 melhorou substancialmente a sua capacidade de carga quando comparado com os muretes de referência (MSV).

Na Tabela 5.8, apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de carga perpendicular ao plano, nomeadamente: força horizontal máxima e deslocamento correspondente, rigidez e energia dissipada para 100% e 85% da força máxima.

Tabela 5.8 - Comparação dos resultados médios obtidos no ensaio de carga perpendicular aos muretes

Murete	$FH_{max}$ [kN]	$\delta_H^{FH_{max}}$ [mm]	K [kN/mm]	U [kN.mm]	
				100% $Fh_{max}$	85% $Fh_{max}$
MVR	19,5	14,5	5,5	234,3	313,0
MVE	17,8	25,0	7,8	337,3	405,4
MSV (Referência)	11,5	30,8	4,9	295,4	358,1

De notar que a utilização de varões expostos a ambientes agressivos (alcalino) em muretes, como é o caso dos MVE1 e MVE2, não teve impacto na degradação da resistência à força horizontal perpendicular ao plano aplicada, como se pode observar no caso de MVE1, em que os valores da carga máxima, de deslocamento e de rigidez à flexão são da mesma grandeza dos da série MVR. Porém, como os varões de GFRP foram envelhecidos num ambiente alcalino a 60°C, apresentavam degradação e poderiam atingir a rotura precocemente, como foi o caso do murete MVE2, em que o varão rompeu no início do ensaio e deixou de contribuir para a resistência do murete. Como é possível ver na Figura 5.19, os valores deste murete (MVE2) são da mesma grandeza dos da série de referência MSV.

Porém, pode constatar-se que a colocação de varões nos muretes contribuiu para um aumento significativo na resistência à força horizontal (Figura 5.19) e para uma diminuição acentuada no deslocamento horizontal correspondente (Figura 5.20).

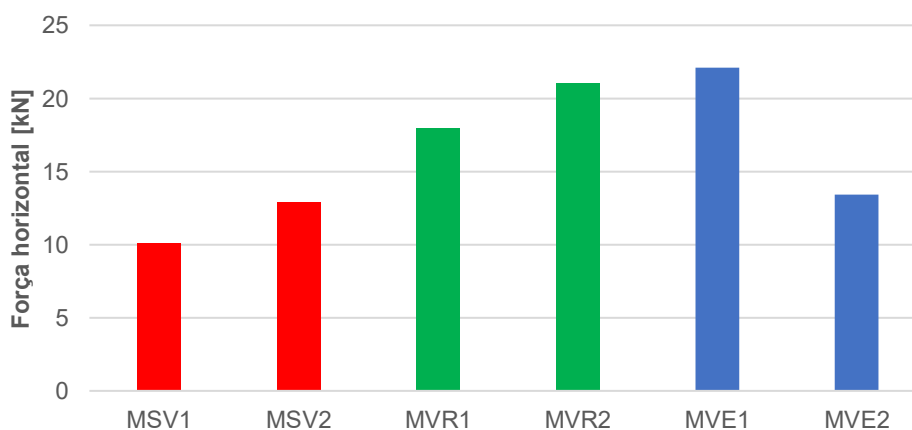


Figura 5.19 - Gráfico da força horizontal média perpendicular ao plano dos muretes de alvenaria

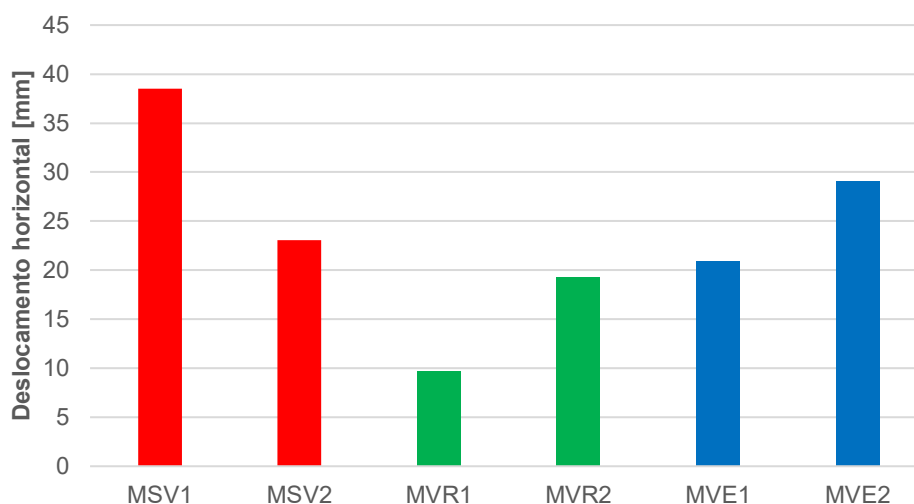


Figura 5.20 - Gráfico do deslocamento médio obtido nos ensaios nos muretes de alvenaria

Na Figura 5.21, comparam-se os resultados obtidos em termos de rigidez dos muretes. É possível verificar que a utilização de varões de GFRP (no seu estado original ou sujeitos a ambiente agressivo alcalino) aumenta significativamente a rigidez dos muretes à força horizontal aplicada perpendicularmente ao seu plano. Com a exceção do MVR1 em que o ensaio não foi realizado nas melhores condições devida à rotação do dispositivo de aplicação da força horizontal.

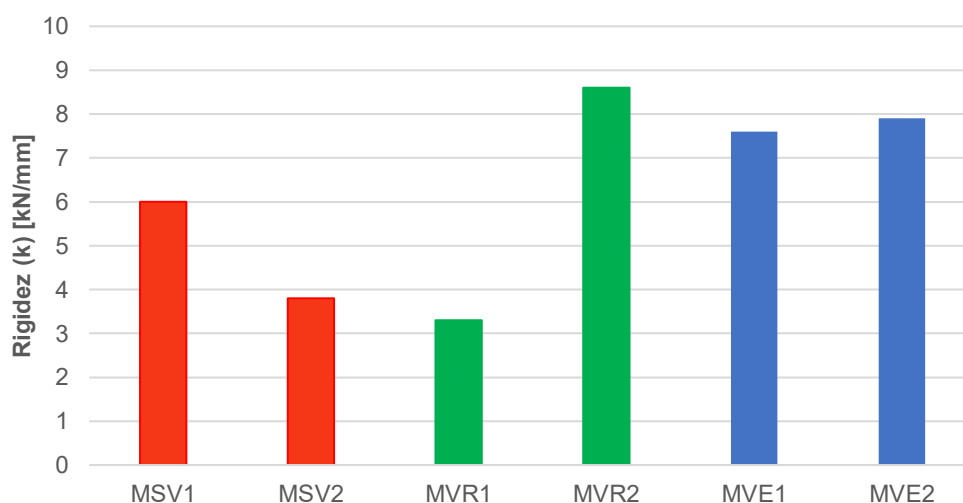


Figura 5.21 - Gráfico de rigidez dos muretes de alvenaria

A rigidez destes muretes aumentou devido às soluções utilizadas – colocação de varões de GFRP nas suas juntas. Contudo, pode-se observar que a rigidez dos muretes da série MVE e MVR (excluindo MVE1), são, em média, da mesma grandeza. No caso do MVE2 ter atingido a rotura, o outro varão foi retirado com sinais de fissuração e desgaste, mas não voltou à sua forma normal como os varões dos muretes MVR, ficando com a deformação final do ensaio aos muretes. Degradação que se verificou posteriormente nos ensaios em flexão, estes varões apresentavam uma degradação significativa, cerca de 60% de diminuição na tensão de rotura em flexão, quando comparado com a referência.

Ao analisar Figura 5.22 e excluindo o murete MVR1, conclui-se que a introdução de varões de GFRP teve influência na dissipação de energia, seja para 100 % ou 85 % da força horizontal, durante o ensaio de carga perpendicular ao plano.

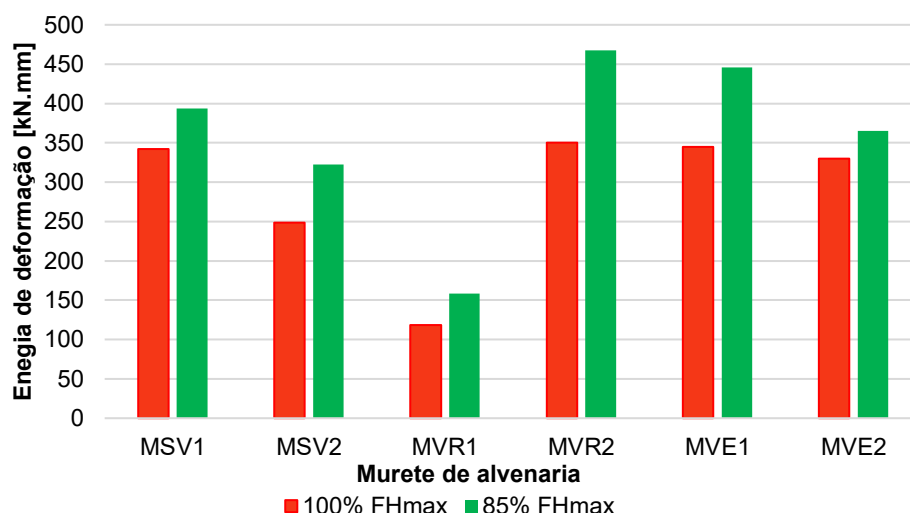


Figura 5.22 - Gráfico da energia dissipada dos muretes de alvenaria

Comparando as soluções de referência (sem GFRP) com as soluções com GFRP, observa-se que para a energia acumulada, tanto para 100%  $F_{h_{max}}$  como para 85%  $F_{h_{max}}$ , em média, apresenta um incremento, evidenciando a vantagem da colocação dos varões para o contributo do conjunto. Este aumento de energia acumulada verifica-se devido à utilização dos GFRP que conduziu ao incremento da resistência à força horizontal aplicada nos muretes.

Em todas as séries de muretes, os modos de rotura apresentaram fissuração vertical na interface tijolo-argamassa e esmagamento do tijolo cerâmico nos apoios. No caso do murete MVR2 observou-se que o modo de rotura, para além dos verificados nos outros muretes, foi controlado pelo corte dos tijolos cerâmicos semelhante ao observado por [37, 38]. No murete MVE2 o modo de rotura foi controlado pela rotura do varão de GFRP, semelhante ao estudo elaborado por [35]. Observou-se em todas as series um rotura por flexão, tendo o caso MVR2 com uma rotura por corte, semelhante a [37].

Os resultados do ensaio em flexão aos varões utilizados no muretes (MVR e MVE) vêm ao encontro do que sucedeu no ensaio de carga monotónica, em que no caso dos varões do murete MVE (GFRP\_MVE) demonstraram ter uma diminuição acentuada na rigidez e tensão de rotura em flexão devido ao envelhecimento no ambiente alcalino. Observando-se que esta degradação conduziu à rotura, como se verificou no caso do ensaio ao murete MVE, o varão rompeu no início do ensaio.

Com a análise aos resultados obtidos, foi possível observar que a colocação de varões de GFRP nos muretes conduziu a bons resultados de resistência mecânica. A sua utilização levou à melhoria da resistência à força horizontal aplicada, redução do deslocamento correspondente, aumento da rigidez e energia média acumulada por deformação.

## Capítulo 6

### Conclusões e desenvolvimentos futuros

#### 6.1. Conclusões

O presente estudo teve como principal objetivo analisar a durabilidade de varões de GFRP quando sujeitos a ambientes agressivos. Deste modo, foi realizada uma campanha experimental com o objetivo de analisar degradação mecânica e física de varões de GFRP e o comportamento quando utilizados em muretes de alvenaria sujeitos a uma carga perpendicular ao seu plano.

Os resultados obtidos nos ensaios aos varões de GFRP permitiram concluir que:

- As curvas de estudo da difusão seguiram um comportamento Fickiano, apresentando uma absorção inicial elevada seguida de um patamar de estagnação. Verificando-se uma difusão mais elevada das amostras de GFRP sujeitas ao ambiente com a temperatura mais alta.
- No ensaio de flexão, verificou-se uma redução da tensão de rotura, tanto para solução salina a 20°C e a 60°C como para a solução alcalina a 60°C, das amostras de GFRP. Porém, foram as amostras sujeitas à temperatura mais elevada e no ambiente alcalino que degradaram de forma mais notória.
- As imagens SEM das amostras de GFRP mostraram que, tanto no corte transversal como no corte longitudinal, a degradação dos varões de GFRP depende da resistência do enrolamento espiral exterior do varão, como foi possível observar às 5000 horas; observou-se uma degradação no núcleo do varão de GFRP quando o enrolamento exterior se desagregou.
- As ações dos ambientes utilizados no presente estudo tiveram impacto irrelevante na temperatura de transição vítrea dos varões de GFRP.

A utilização de varões de GFRP em muretes tem a vantagem de implicar benefícios estruturais notáveis, mantendo a aparência original e cumprindo os problemas de durabilidade e manutenção. Devido à leveza dos materiais envolvidos, os requisitos de equipamentos e manobra são reduzidos e simplificados.

Com o ensaio de carga perpendicular ao plano dos muretes de alvenaria, foi possível concluir que:

- A utilização de varões de GFRP em muretes de alvenaria melhorou capacidade resistente à força horizontal, deslocamento correspondente, a rigidez e a energia média por deformação.
- O modo de rotura dos muretes foi controlado por fissuração na interface tijolo-argamassa, rotura dos GFRP, esmagamento e corte do tijolo cerâmico.
- Os varões de GFRP expostos a ambientes agressivos alcalino afetaram diretamente a resistência a cargas perpendiculares ao plano. No caso do murete MVE2 a degradação levou à

rotura precoce, deixando de contribuir para a resistência do murete à força horizontal aplicada. No caso do murete MVE1 melhorou substancialmente a capacidade de carga;

- O método utilizado - varões de GFRP nas juntas horizontais – acabou por aplicar forças de corte nas juntas onde foram colocados, destacado a argamassa;
- O encastramento parcial nos apoios controlou a deformação dos muretes.

Apesar de ser um sistema que requer mais estudo, a utilização de varões de GFRP em muretes demonstrou ser uma solução viável. A sua utilização, para além de ser fácil de aplicar, poderá ter um futuro promissor na construção civil.

## **6.2. Desenvolvimentos Futuros**

Com a conclusão do presente trabalho, que permitiu ampliar o conhecimento sobre a influência de ambientes de exposição em varões de GFRP e quando colocados em muretes de alvenaria de tijolo cerâmico. Sugere-se a continuidade do trabalho de estudo nos varões de GFRP, quer no campo de envelhecimento acelerado quer na sua utilização em muretes, aproveitando os resultados para comparação.

- Como ficou concluído no presente estudo, a influência na degradação dos varões de fibra de vidro depende da resistência do enrolamento espiral exterior, o que leva a considerar o seu estudo para uma melhor proteção no varão.
- Como o estudo da durabilidade é realizado em ambiente laboratorial, de modo a representar o ambiente real, será de interesse estudar a equivalência do tempo utilizado em laboratório relativamente ao tempo real. Como tal, em trabalhos futuros, dever-se-á verificar a aplicabilidade da teoria de Arrhenius, de modo a responder à questão da equivalência laboratório/horas reais.
- Investigações experimentais adicionais em muretes com a colocação de varões de GFRP. Realizando uma campanha experimental com outro tipo de envelhecimento nos varões de GFRP de modo a conseguir comparar com os resultados obtidos no presente estudo e promover o conhecimento de mecanismos do conjunto. Além disso, a realização de testes *in situ* poderá revelar o efeito real da utilização de FRPs em alvenaria sob condições de carga de serviço.



## Referências Bibliográficas

- [1] Cabral da Fonseca, S., Correia, J. R., Costa, R., Carreiro, A., Rodrigues, M. P., Eusébio, M. I., Branco, F. A., "Environmental degradation of GFRP pultruded profiles made of polyester and vinylester resins", 15th International Conference on Composite Structures, Porto, junho de 2009.
- [2] Correia, J. R., "Perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP). Aplicação de vigas mistas GFRP-Betão na construção", Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, março de 2004.
- [3] Correia, J. R., Branco, F. A., Ferreira, J. G., "Comportamento mecânico de perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP) e das suas ligações", Construção 2004, Congresso Nacional da Construção, FEUP, Porto, 2004.
- [4] Nanni, A., "Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for concrete Structures: Properties Structures", Elsevier, USA, 1993.
- [5] Correia, J. R., "GFRP Pultruded Profiles in Civil Engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour", Dissertação para obtenção de grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 420p, 2008.
- [6] Costa, R. L., "Durabilidade de perfis pultrudidos de poliéster reforçado com fibras de vidro (GFRP)", Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, novembro, 2009.
- [7] Estevão, M. "Durabilidade de varões de GFRP para reforço de elementos de betão armado", Dissertação de Mestrado em engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2017.
- [8] Bíblia, Português, Bíblia sagrada: Antigo testamento. Difusora Bíblica, 2144 p, 2015.
- [9] Zoghi, M., "The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering." CRC Press, setembro de 2013.
- [10] Hauff, V. Common future (World commission on environment and development). Oxford University Press. Oxford, UK, 1987.

- [11] Holloway, L. "Polymer Composites for Civil and Structural Engineering." 1ª edição, Springer-Science+Business Media, B.V. Guildford, Inglaterra, 1993.
- [12] Karbahari, V. M., "Durability of composites for civil structural applications – Fabrication, quality and service-life issues for composites in civil engineering", Woodhead Publishing Limited, Cambridge, Inglaterra, 2007.
- [13] Cabral da Fonseca, S. "Materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras usados na engenharia civil – Características e aplicações" Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ICTM 35, Lisboa, 2005.
- [14] Correia, J. R., Branco, F. A., Ferreira, J. G., "Perfis pultrudidos de fibra de vidro: um material para a reabilitação estrutural", Construção Magazine, edição Inovação e Reabilitação, No. 28, 21-26, 2008.
- [15] Gosnell, R.B., "Thermoplastic Resins", Section 2 of Engineered Materials Handbook, Vol 1, Composites, ASM International Metals Park, Ohio, 97-104, 1987.
- [16] Soares, C. M., Martins, J. G., "Reforço de estruturas de betão com CFRP", Monografia, Universidade Fernando Pessoa, 2006.
- [17] Composite Processing Association, "FRP composites – What are they & why are they used?", The representative body of the UK composites industry, Pontyclun, UK, 2000.
- [18] Roberts, R. W., "Cure quality Control", Section 10 of Engineered Materials Handbook, Vol. 1, composites, ASM International, Metals Park, Ohio, 745-760, 1987.
- [19] Strong, A. B., "Fundamentals of Composites manufacturing materials, methods and applications", Society of Manufacturing Engineers, 1989.
- [20] Robert, M., Wang, P., Cousin, P., Benmokrane, B., "Temperature as an accelerating factor for long-term durability testing FRPs: should there be any limitations?" Journal of Composites for Construction, Vol. 14, No. 4, 361-366, 2010.
- [21] Karbhari, V. M., "Gap analysis for durability of fiber reinforced polymer composites in civil infrastructures – Chapter 1: Introduction", The Civil Engineering Research Foundation (CERF), 2001.

- [22] Huston, D., Juska, T., Karbhari, V. M., Morgan, R., Williams, C., "Gap analysis for durability of fiber reinforced polymer composites in civil infrastructures – Chapter 3: Effects of Moisture/Aqueous Solutions", The Civil engineering Research Foundation (CERF), 2001.
- [23] Apicella, A., Migliaresi, C., Nicolais, L., Iaccarino, L., Roccotelli S., "The water ageing of unsaturated polyester-based composites: influence of resin chemical structure", *Composites* 14, 387-392, 1983.
- [24] Ghorbel, I., Valentin, D., "Hydrothermal effects on the physic-chemical properties of pure and glass fiber reinforced polyester and vinylester resins", *Polymer Composites*, 14, 324-334, Agosto de 1993.
- [25] Liao, K., Schultheisz, C. R., Hunston, D. L., "Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP", *Composites, Part B*, Vol. 30, No. 5, 485-493, 1999.
- [26] Alawsi, G., Aldajah, S., Rahmaan, S. A., "Impact of humidity on the durability of E-glass/polymer composites", *Materials and Design-Reigate*, Vol. 30, No. 7, 2506-2512, Amesterdão, 2009.
- [27] Karbhari, V. M., Chin, J.W., Hunston, D., Benmokrane, B., Juska, T., Morgan, R., Lesko, J. J., Sorathia, U., Reynaud, D., "Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure", *ASCE Journal of Composites in Construction*, 7, 238-247, agosto de 2003.
- [28] Crea, F., Porco, G., Zinno, R., "Experimental evaluation of thermal effects on the tensile mechanical properties of pultruded GFRP rods", *Applied Composite Materials*, Vol. 4, No. 3, 133-143, 1997.
- [29] Robert, M., Wang, P., Cousin, P., Benmokrane, B., "Temperature as an accelerating factor for long-term durability testing FRPs: should there be any limitations?", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 4, 361-366, 2010.
- [30] Silva, B. "Durabilidade de perfis pultrudidos de poliéster reforçado com fibras de vidro (GFRP) utilizados em reabilitação", *Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, novembro, 2012.
- [31] Hristozov, D., Wroblewski, L., Sadeghian, P., "Durability of Flax FRPs Exposed to Accelerated Environmental Conditions", *Universidade de Sherbrooke*, Sherbrooke, Quebec, Canada, julho de 2017.

- [32] Ishai. O., "Environmental effects on deformation, strength, and degradation of unidirectional glass-fiber reinforced plastics, Survey", Polymer Engineering and Science, Vol. 15, No. 7, 491-499, julho de 1975.
- [33] Laursen, P. T., Seible, F., Hegemier, G. A. and Innamorato, D., "Seismic Retrofit and Repair of Masonry Walls with Carbon Overlays." Proceedings of the 2nd International Conference on Non-Metallic Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Gent, Belgica, 23-25, 616-627, agosto de 1995.
- [34] Ehsani, M, Velazques-Dimas, J. "Behavior of retrofitted URM wall under simulated earthquake loading." ASCE, Journal of Composites for Construction, 5(3), 139-145, 1999.
- [35] Hamilton III, H. R., Dolan, C. W., "Flexural Capacity of Glass FRP Strengthened Concrete Masonry Walls," ASCE Journal of Composites for Construction, 3(3), 134-142, agosto de 2001.
- [36] Hamoush, S. A., McGinley, M. W., Mlakar, P., Scott, D. and Murray, K. "Out-of-Plane Strengthening of Masonry Walls with Reinforced Composites." ASCE, Journal of Composites for Construction, 5(3), 139-145, 2001.
- [37] Galati, N., Tumialan, J. G., La Tegola, A., Nanni, A., "Influence of Arching Mechanism in Masonry Walls Strengthened with FRP Laminates CIES Report", University of Missouri-Rolla, Rolla (MO), Junho de 2002.
- [38] Tan, K. H., and Patoary, M. K. H. "Strengthening of Masonry Walls against Out-of-plan loads Using Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement." Journal of Composites for Construction, 8(1), 79-87, janeiro de 2004.
- [39] Gonçalves da Silva M. A. "Influence of environmental ageing on properties of polymeric mortars". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, 461-468, 2004.
- [40] D4476 – 09. "Standard test method for flexural properties of fiber reinforced pultruded plastic rods", 2009.
- [41] ISO 11357-1. "Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC), Part 1: General principles", 2016.
- [42] Silva, D., "Reforço de Arcos de Alvenaria de Tijolo com FRP", Dissertação de Mestrado em engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2018.

- [43] NP EN 772-16., “Métodos de ensaio de blocos para alvenarias. Parte 16: Determinação das dimensões”, 2002.
- [44] NP EN 772-13., “Métodos de ensaio de blocos para alvenarias. Parte 13: Determinação da massa volúmica real seca e da massa volúmica aparente seca de blocos para alvenarias (exceto blocos de pedra natural)”, 2002.
- [45] NP EN 772-3., “Métodos de ensaio para elementos e alvenarias. Parte 3: Determinação do volume líquido e da percentagem de furação em elementos cerâmicos para alvenarias por pesagem hidrostática”, 2000.
- [46] NP EN 772-1., “Métodos de ensaio de blocos de alvenarias. Parte 1: Determinação da resistência à compressão”, 2002.
- [47] EN 1015-11. “Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”, 1999.



## **Anexos**







### Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB Glass Fiber Rods / Sand-Coated FRP Bars

#### DESCRIPTION

The Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB are fabricated from high-strength glass with an extremely durable epoxy using a pultrusion process combined with filament wound spiral deformation.

#### USE

Reinforcement for concrete elements, especially where corrosion is a factor, such as waterfront structures. Additionally, Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB can be used where concrete elements are subjected to deicing salts or other corrosive agents, or when electrical or magnetic neutrality is required.

#### ADVANTAGES

- Non-corrosive
- Consistent modulus of elasticity
- Four times lighter than steel
- Non-metallic and non-conductive
- Pre-fabricated angles and bends to ACI standard are available
- Square or rectangle sections available

#### STANDARD VALUES

##### MECHANICAL PROPERTIES FOR THE TYFO® FIBR RE-BAR™ GRB GLASS/VINYL ESTER SYSTEM

Bar Size	Tensile Modulus of Elasticity <sup>1</sup>		Ultimate Tensile Strength		Guaranteed Design Tensile Strength <sup>2</sup>		Ultimate Strain in Tension
	$E_f$		$f_u$		$f_{fu}$		$E_f/f$
	GPa	Msi	MPa	ksi	MPa	ksi	%
#2	46.1	6.6	877	127	788	114	1.9
#3	43.2	6.3	852	123	765	111	1.97
#4	43.9	6.4	788	114	708	103	1.79
#5	46.7	6.8	761	110	683	99	1.63
#6	46.1	6.7	730	106	656	95	1.58
#8	49.1	7.1	665	96	597	87	1.59

<sup>1</sup> Defined as  $E_f$  in the proposed ACI 440.1R-06 design recommendations

<sup>2</sup> Guaranteed tensile strength is the average ultimate tensile strength minus three times the standard deviation

##### ADDITIONAL MECHANICAL PROPERTIES FOR THE TYFO® FIBR RE-BAR™ GRB GLASS/VINYL ESTER SYSTEM

Bar Size	Flexural Strength		Flexural Modulus of Elasticity <sup>1</sup>		Ultimate Strain in Flexure <sup>1</sup>	Shear Strength <sup>1</sup>	
	$E_f$		$f_u$		$E_f/f$	$F_s$	
	MPa	ksi	GPa	Msi	%	MPa	ksi
#2	1120	162	52.9	7	2.12	225	32.6
#3	929	135	49.5	7.2	1.88	183	27
#4	842	122	44.5	6.4	1.89	220	32
#5	784	114	41.9	6.1	1.87	199	29
#6	707	102	47.3	6.9	1.49	204	30
#8	655	95	46.7	6.8	1.4	206	30

<sup>1</sup> Items not defined in the proposed ACI 440.1R-06

##### PHYSICAL PROPERTIES FOR THE TYFO® FIBR™ RE-BAR™ GRB GLASS/VINYL ESTER SYSTEM

Bar Size		Cross-sectional Area		Nominal Diameter	
mm	in	mm <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>	mm	in
#10	#3	71	0.11	9.5	3/8
#13	#4	129	0.20	12.7	1/2
#16	#5	200	0.31	15.9	5/8
#19	#6	284	0.44	19.1	3/4
#25	#8	507	0.79	25.4	1

Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB is standard in 20 and 40 foot lengths.  
Please contact Fyfe Co. LLC for further information.

2/10 Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB

## DESIGN OF THE TYFO® FIBR RE-BAR™ GRB

### DESIGN

Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB pre-fabricated angles and bends to the ACI standard is available. The Fyfe Co. LLC engineering staff will provide preliminary design at no obligation.

### PLACEMENT AND ASSEMBLY

Placing of Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB is done in a similar fashion to steel bars. Unless otherwise specified in project specifications, the bars should be placed within the tolerances specified in ACI 117 ("Standard Tolerances for Concrete Construction and Materials"). Common placing practices should apply with the following exceptions:

Because it is lightweight, fiberglass reinforcement should be adequately secured in the forms to prevent displacement by concrete placement or workers. Plastic or non-corrosive chairs can be used to elevate the rebar on spacing determined by the bar diameter.

Plastic or nylon ties, and plastic snap ties can be used in tying the bars in applications where corrosion resistance or total absence of metals is paramount. Standard metal tie wire, coated tie wire, and stainless steel tie wire can also be used. Fiberglass rebar can also be lap spliced to metal rebar as long as mechanical fastening devices that could damage the bar are not used.

Whenever continuity is required in the reinforcement, lapped splices should be used. Mechanically connected or welded splices are not possible with composite reinforcing bars. The length of lap splices varies with concrete strength, type of concrete, rebar grade, size, spacing and cover. In the absence of other specifications, an overlap of forty (40) bar diameters should be utilized.

### BENDS

Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB is a thermoset composite, and cannot be bent on the job site after it has been polymerized (cured). Bends can be produced during the manufacturing process in virtually any shape that can be obtained with steel rebar, although typically a little more generous bend diameter will be required. As a general guideline, multiplying the bar diameter (in inches) by a factor of 3.5 will give you an approximate minimum bend radius for a 90-degree bend. Similarly, multiplying the bar diameter by a factor of 7 will give you the minimum bend diameter for a 180-degree bend. In any job where bending dimensions are critical, contact should be made with the supplier to verify bending capability. Based on testing, approximately 50-60% of the guaranteed design strength of a straight bar is retained after making a 90 degree bend.

### STORAGE CONDITIONS

Avoid placing Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB directly on the ground during storage. If stored outdoors for extended periods of time, the bars should be covered with opaque plastic or other types of cover to protect the bars ultraviolet rays and chemical substances.

### CAUTION!

### HANDLING

Care is advised in the handling Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB during storage and placement. Reinforcing bars should be handled with heavy duty working gloves to avoid hand cuts and injuries from sharp edges.

### SAFETY PRECAUTIONS

When cutting, use of an approved particle mask is recommended for possible airborne particles. Gloves are recommended when handling. Safety glasses are recommended to prevent eye irritation.

### FIRST AID

If serious cuts or abrasions are caused during handling, seek medical attention immediately.

### CLEANUP

Dispose of in accordance with local disposal regulations.

**CONSULT MATERIAL SAFETY DATA SHEET (MSDS) FOR MORE INFORMATION. KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN. FOR INDUSTRIAL USE ONLY.**

## Fyfe Co. LLC

Tyfo® Fibrwrap® Systems

8380 Miralani Drive, Suite A, San Diego, CA 92126

Tel: 858.642.0694 Fax: 858.444.2982

E-mail: [info@fyfeco.com](mailto:info@fyfeco.com) Web: <http://www.fyfeco.com>

**Statement of Responsibility:** The technical information and application advice in this publication is based on the present state of our best scientific and practical knowledge. As the nature of the information herein is general, no assumption can be made as to the product's suitability for a particular use or application, and no warranty as to its accuracy, reliability or completeness, either expressed or implied, is given other than those required by State legislation. The owner, his representative or the contractor is responsible for checking the suitability of products for their intended use. Field service, where provided, does not constitute supervisory responsibility. Suggestions made by the Fyfe Co., either verbally or in writing, may be followed, modified or rejected by the owner, engineer or contractor since they, and not the Fyfe Co., are responsible for carrying out procedure appropriate to a specific application.

2/10 Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB

Patented in U.S.A., Canada, and other countries. © Copyright 2005-2010 Fyfe Co. LLC 7-10

## S&P Resin 55 HP

Adesivo epóxi (resina de laminação)



SP-PT.08.01.19.01

### DESCRIÇÃO

Resina epóxi bi-componente de elevado desempenho, isenta de solventes, de elevada resistência e elevado módulo, usada para impregnação de mantas e tecidos S&P Sheets e como primário sobre o substrato.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

### CAMPOS DE APLICAÇÃO

- A S&P Resin 55 HP é usada como resina de laminação/impregnação e colagem para os seguintes sistemas S&P:
  - S&P C-Sheet
  - S&P G-Sheet
  - S&P A-Sheet
  - C-Laminate slot-applied (inseridos)
- As mantas e tecidos com menos de 400 g/m² podem ser directamente impregnadas sobre o substrato
- Mantas e tecidos com mais de 400 g/m² devem ser pré-impregnadas de resina pelo método wet lay-up.

### VANTAGENS DO PRODUTO

- Excelente penetração nas fibras, boa capacidade de impregnação
- Elevada estabilidade
- Excelente aderência ao betão e aço
- Resistente a ácidos diluídos, bases, soluções salinas, óleos minerais e hidrocarbonetos alifáticos
- Resistente a agentes climáticos

### DADOS DO PRODUTO

#### Descrição Genérica

S&P Resin 55 HP

#### Cor / aparência

Componente A - Solução de resina epóxi: Líquido/ ligeiramente amarelada

Componente B - Endurecedor para resina epóxi: Viscosa/ ligeiramente amarelada

#### Fornecimento

Unidades de 6 kg e 13 Kg

#### Densidade

Comp. A: 1,17 kg/l

Comp. B: 0,98 kg/l

Mistura: Approx. 1,15 kg/l

#### Armazenamento

Componentes A e B - validade de 24 meses, nas embalagens originais a temperatura de +5 °C a +35 °C



01.2018

## S&P Resin 55 HP

Adesivo epóxi (resina de laminação)



### APLICAÇÃO

Aplicável em superfícies com humidade superficial até 4%. As superfícies devem-se encontrar limpas e isentas de óleos, gorduras ou partículas soltas.

A S&P Resin 55 HP é fornecida na relação de mistura prescrita. O Componente B (endurecedor) é misturado no componente A (Resina). É importante que seja utilizado todo o endurecedor. Os dois componentes devem ser misturados usando uma misturadora de velocidade controlada de baixa rotação e com pás misturadoras apropriadas.

Misturar cuidadosamente de forma a remexer junto das paredes e fundo do balde, garantindo a mistura completa do componente B. Após esta operação, a mistura deve apresentar-se homogénea, sem grumos e de cor uniforme.

A temperatura dos dois componentes no momento da mistura deve idealmente estar entre 15 °C a 20 °C.

Temperaturas mais elevadas reduzem consideravelmente o tempo de aplicação.

A S&P Resin 55 HP deve ser protegida de humidade durante 6-8 horas após a aplicação. Caso haja contacto com vapor de água/humidade durante este período, a superfície ficará branca e pegajosa. Não obstante, a resina sob a superfície tem a capacidade de curar normalmente. Em áreas descoloradas ou pegajosas a aderência a qualquer revestimento é reduzida ou até inviabilizada.

Os valores abaixo indicados consideram +20 °C e 50 % de humidade relativa do ar.

#### Consumo

Aproximadamente 150 a 1 400 g/m² dependendo da temperatura, porosidade do substrato e sistema S&P Sheet a aplicar (ver manual)

### INFORMAÇÃO TÉCNICA

S&P RESIN 55 HP Adesivo epóxi (resina de laminação)	Método de ensaio	Unidades	Desempenho
Módulo de elasticidade	EN 13412:2008	N/mm²	≥ 3 200
Trabalhabilidade (pot-life)	EN ISO 9514 EN 1542	Minutos	45
Resistência à compressão	EN 12190:1999	N/mm²	≥100
Coefficiente de expansão térmica	EN 1770:1999	µm/m °C	60
Temperatura de transição vítrea (Tg)	EN 12614:2006	°C	53,5
Retração linear	EN 12617-1:2004	%	0,02
Aderência aço/aço (corte)	EN 12188:2000	N/mm²	50° ≥ 50    60° ≥ 60    70° ≥ 70
Aderência aço/aço (resistência à tracção)	EN 12188:2000	N/mm²	15,9
Alongamento à rotura	ASTM D638	%	1,73
Relação de mistura		Em peso	4,2 : 1,8 (A:B)
Temperatura de aplicação		°C	Entre + 8 e + 35
Seco ao tacto após		Horas	4
Tempo de endurecimento		Dias	7

Os resultados dos ensaios foram obtidos em laboratório de acordo com o método e norma indicados

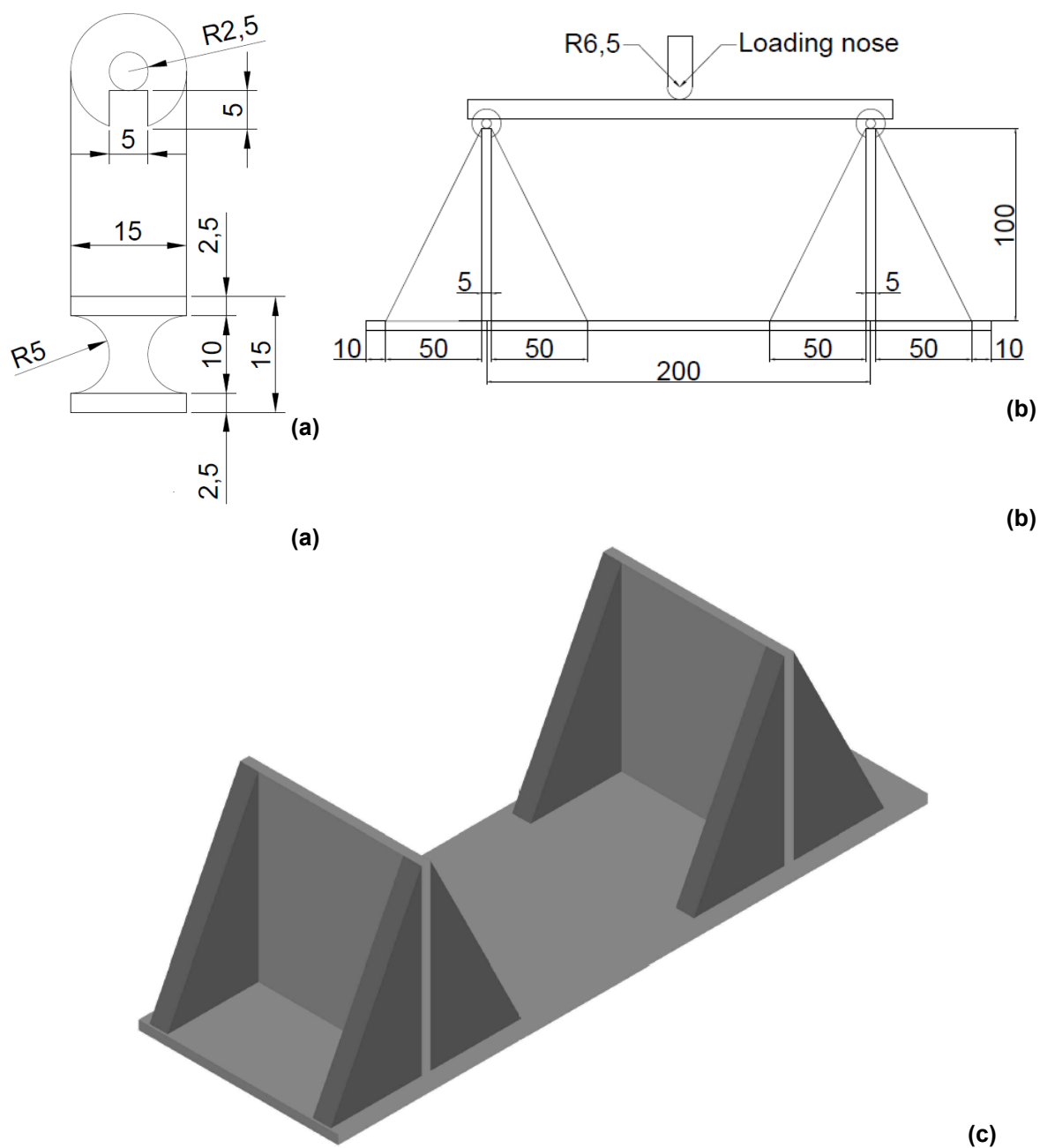
### ENSAIOS

Todos os dados técnicos desta ficha baseiam-se em testes laboratoriais. Podem verificar-se desvios aos valores apresentados por circunstâncias fora do nosso controlo.

Contacte-nos para informação detalhada sobre ensaios efectuados. Estão disponíveis relatórios de ensaio.

## Anexo C

Dimensionamento da estrutura metálica para ensaio de flexão em varões de GFRP



(a) dispositivo de apoio dos varões para ensaio em flexão, medidas em mm; (b) apoio metálico para varões de GFRP, medidas em mm; (c) 3D de apoio metálico para apoio de varões de GFRP

Figura C.1 - Dimensionamento de peças metálicas para ensaio de flexão de varões de GFRP



## Anexo D

### Resultados individuais de ensaio de flexão em varões de GFRP

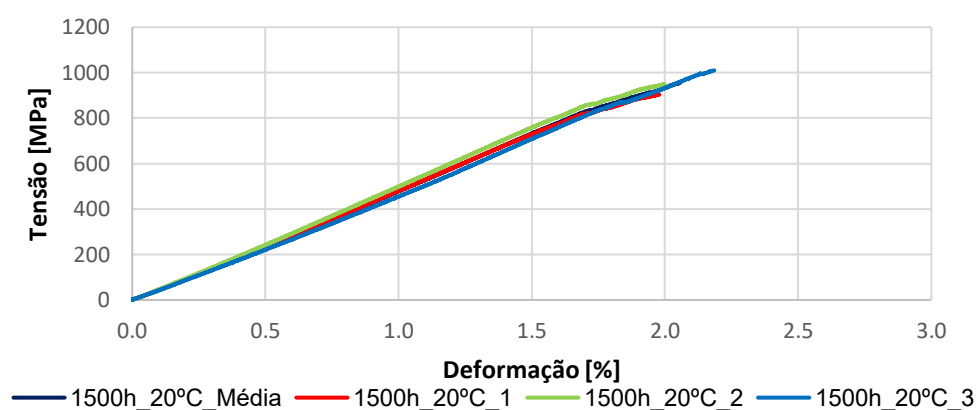


Figura D.1 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 20°C com 1500h

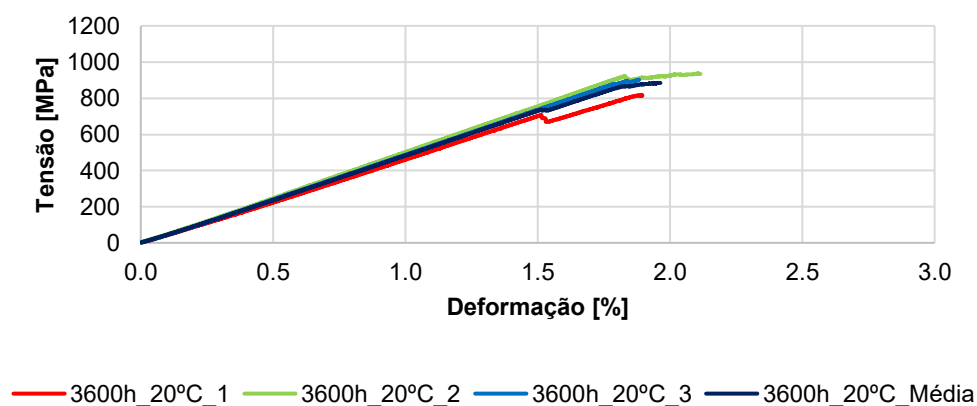


Figura D.2 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 20°C com 3600h

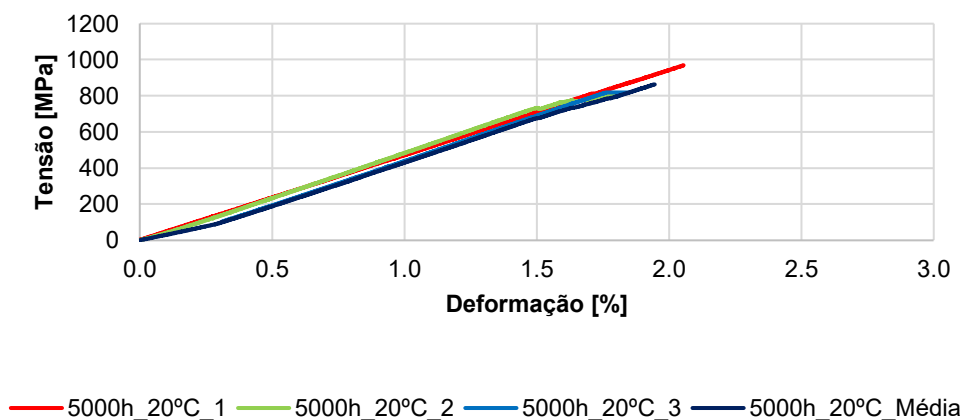


Figura D.3 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 20°C com 5000h

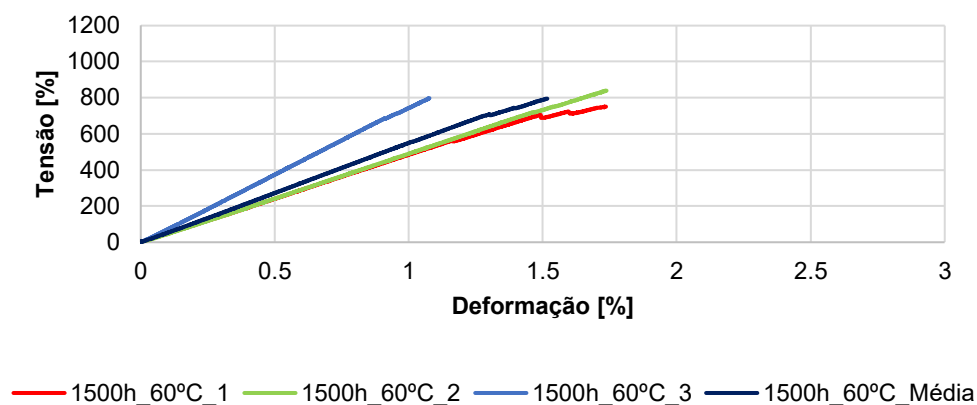


Figura D.4 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 60°C com 1500h

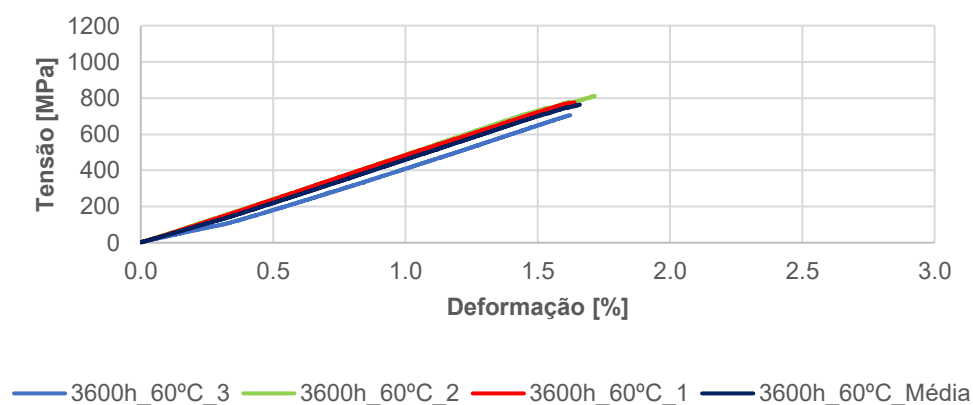


Figura D.5 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 60°C com 3600h

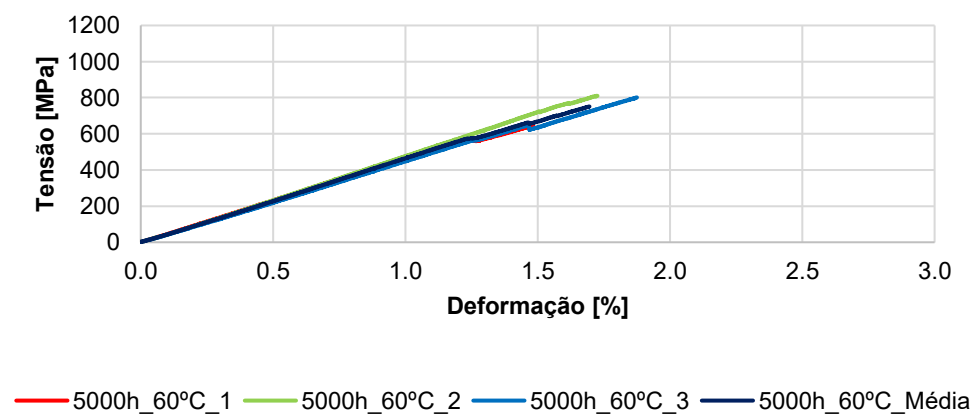


Figura D.6 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP sujeitos a ambiente salino de 60°C com 5000h



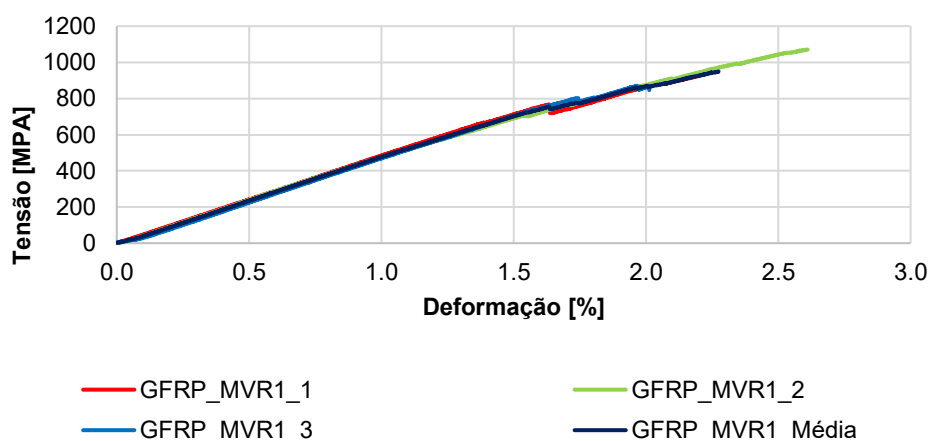


Figura D.7 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP retirados do murete MVR1

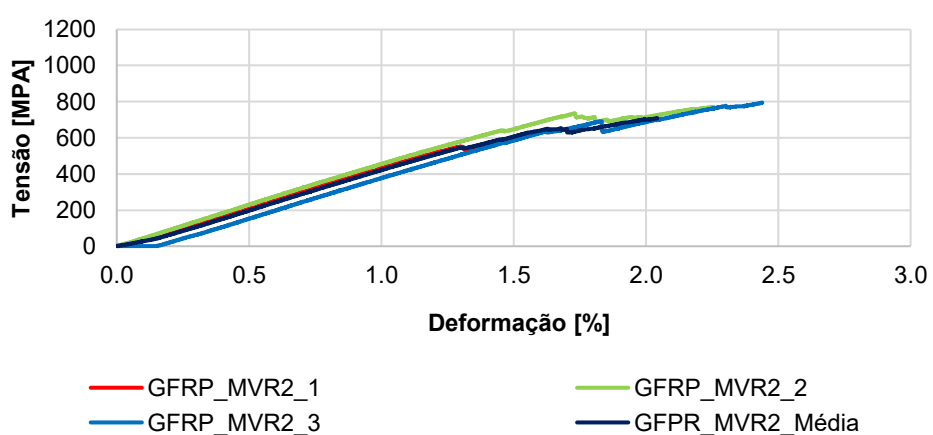


Figura D.8 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP retirados do murete MVR2

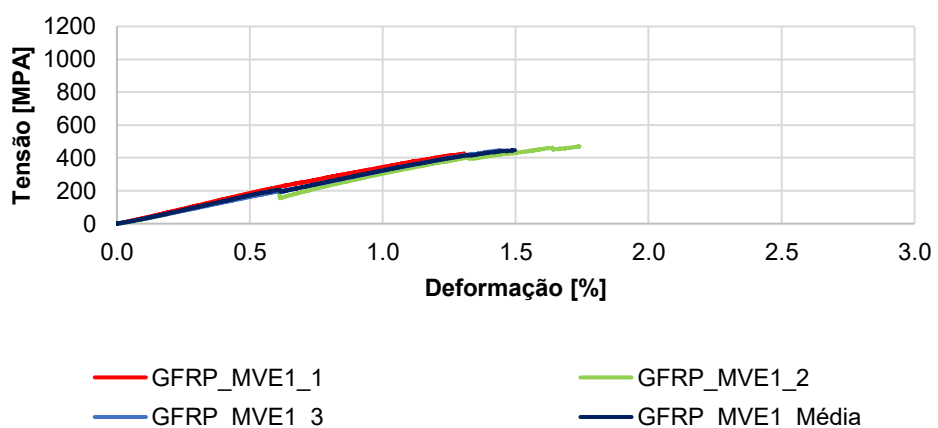


Figura D.9 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP retirados do murete MVE1

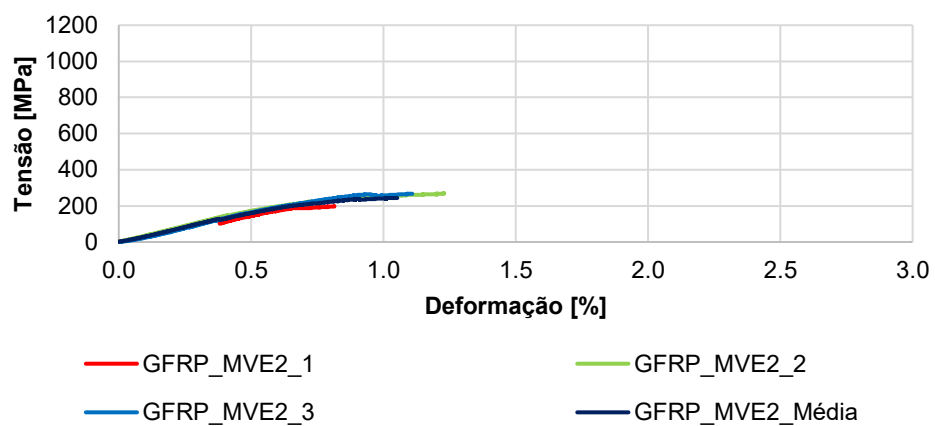
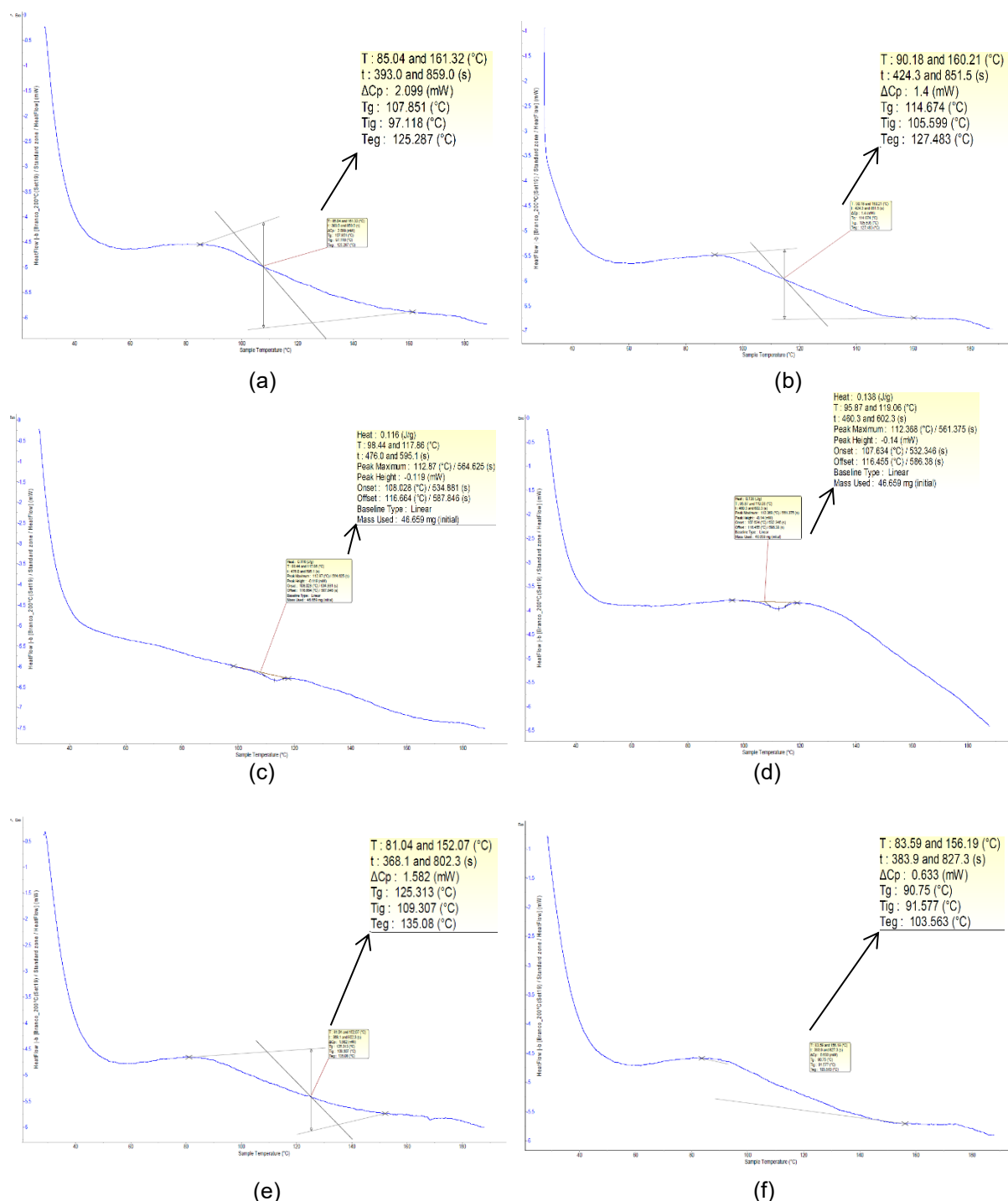


Figura D.10 - Diagrama tensão-deformação de varões de GFRP retirados do murete MVE2

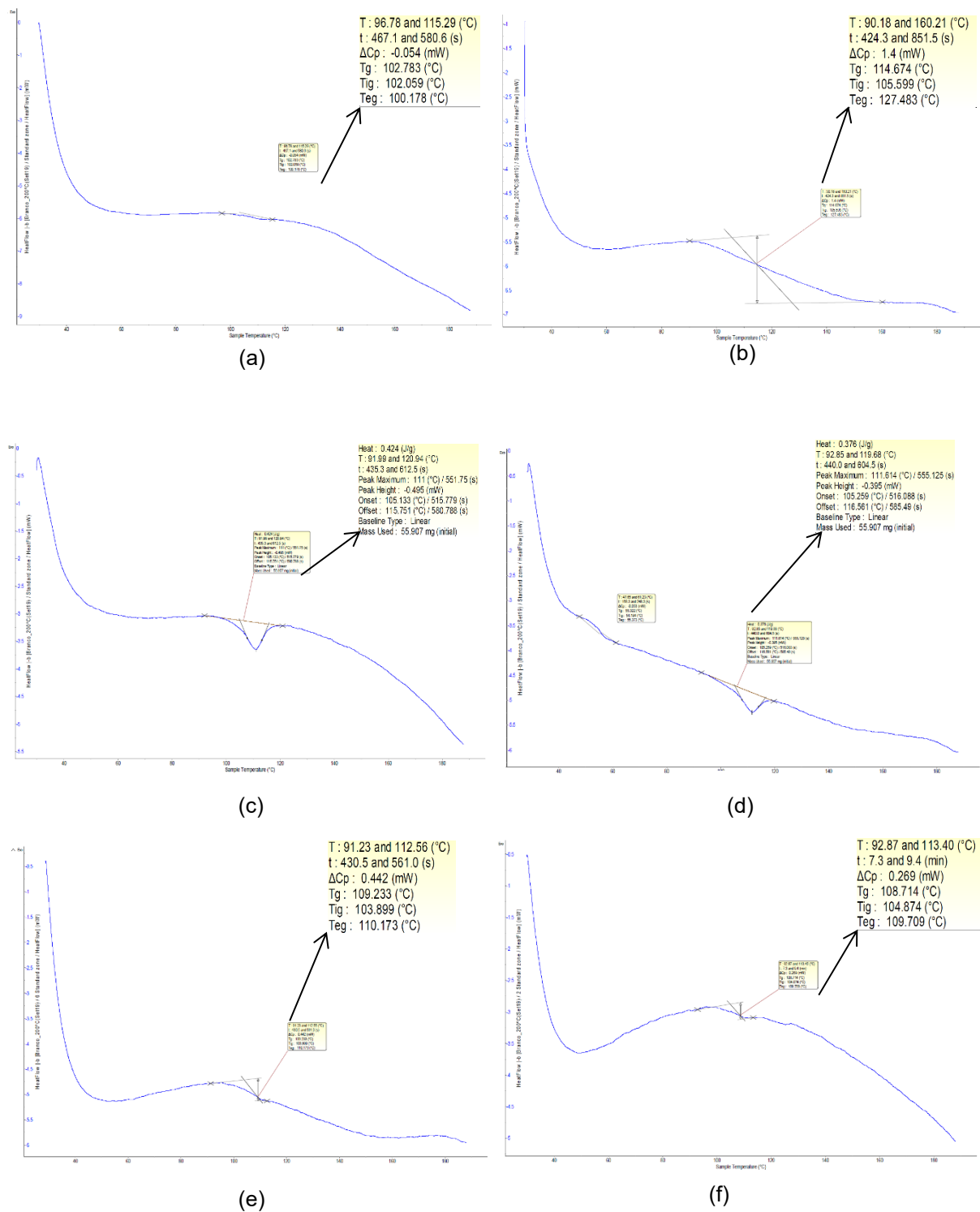
# Anexo E

## Resultados individuais de ensaio de Tg em varões de GFRP



(a) amostra de varão de GFRP com 1500h, 1º ensaio 2º aquecimento; (b) amostra de varão de GFRP com 1500h, 2º ensaio 2º aquecimento; (c) amostra de varão de GFRP com 3600h, 1º ensaio 2º aquecimento; (d) amostra de varão de GFRP com 3600h, 2º ensaio 2º aquecimento; (e) amostra de varão de GFRP com 5000h, 1º ensaio 2º aquecimento; (f) amostra de varão de GFRP com 5000h, 2º ensaio 2º aquecimento;

Figura E.1 - Diagrama para a determinação de Tg em varões de GFRP sujeitos ao ambiente salino de 20°C



(a) amostra de varão de GFRP com 1500h, 1º ensaio 2º aquecimento; (b) amostra de varão de GFRP com 1500h, 2º ensaio 2º aquecimento; (c) amostra de varão de GFRP com 3600h, 1º ensaio 2º aquecimento; (d) Amostra de varão de GFRP com 3600h, 2º ensaio 2º aquecimento; (e) amostra de varão de GFRP com 5000h, 1º ensaio 2º aquecimento; (f) amostra de varão de GFRP com 5000h, 2º ensaio 2º aquecimento;

Figura E.2 - Diagrama para a determinação de Tg em varões de GFRP sujeitos ao ambiente salino de 60°C